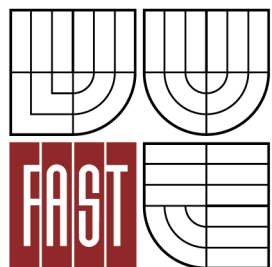




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV CHEMIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF CHEMISTRY

DŘEVOKOMPOZITY S ALKALICKY AKTIVOVANOU POPÍLKOVOU MATRICÍ

ALKALI ACTIVATED FLY ASH COMPOSITES WITH WOODEN FILLER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

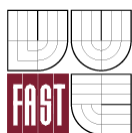
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. DAVID BRÝDL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

RNDr. PAVEL ROVNANÍK, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav chemie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. David Brýdl
Název	Dřevokompozity s alkalicky aktivovanou popílkovou maticí
Vedoucí diplomové práce	RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2011
Datum odevzdání diplomové práce	13. 1. 2012
V Brně dne 31. 3. 2011	

.....
prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

1. PEHANICH, Jennifer L., BLANKENHORN, Paul R., SILSBEEB, Michael R. Wood fiber surface treatment level effects on selected mechanical properties of wood fiber–cement composites. *Cement and Concrete Research* 2004, 34, p. 59-65.
2. ROUSEKOVÁ, I., et al. *Stavebné materiály*. Bratislava: Jaga group, 2000. Drevo, p. 205-210.
3. SHI, C., KRIVENKO, P. ROY, D. *Alkaline-Activated Cements and Concretes*, Taylor and Francis, London 2006.
4. Van de LINDT, J.W., et al. Application and feasibility of coal fly ash and scrap tire fiber as wood wall insulation supplements in residential buildings. *Resources, Conservation and Recycling* 2008, 52, p. 1235-1240.
5. PALOMO, A., GRUTZECK, M.W., BLANCO, M.T. Alkali-activated fly ashes. A cement for the future. *Cement and Concrete Research* 1999, 29, p. 1323-1329.

Zásady pro vypracování

Proveďte literární rešerši v oblasti dřevokompozitních materiálů s anorganickou maticí. Nejprve koncipujte vhodnou matici na bázi geopolymery z vysokoteplotního popílku (Dětmarovice, Chvaletice). U vybrané geopolymerní matrice stanovte základní mechanické parametry a charakterizujte mikrostrukturu pojiva (porozimetrie, SEM). Koncipujte kompozitní materiál s vybranou geopolymerní maticí a dřevěnými štěpkami jako plnivem. U připravených dřevokompozitů stanovte základní mechanické a tepelně izolační vlastnosti. Výsledky zpracujte do přehledných tabulek a grafů a zhodnoťte v závěru. Rozsah práce 60 až 70 stran.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....
RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá možností vytvoření kompozitu převážně z odpadních materiálů. Matrice tohoto kompozitu byla vytvořena z vysokoteplotního popílku typu F, který byl aktivován sodným vodním sklem. Funkci plniva zastávala dřevní štěpka. Diplomová práce se skládá z literární rešerše a experimentální části. Literární rešerše co nejvíce postihuje problematiku dřevokompozitů s anorganickou maticí, a také základních složek vytvářeného kompozitu, tedy alkalicky aktivovaného popílku a dřeva. V experimentální části byly vytvářeny popílkové pasty, z nichž byla vybrána nejvhodnější pro zhotovení kompozitu. U dřevokompozitu s alkalicky aktivovanou popílkovou maticí byly zkoumány vlastnosti v závislosti na dávce dřevní štěpky.

Klíčová slova :

Dřevokompozit, popílek, alkalická aktivace, dřevní štěpka

Abstract

This thesis examines the possibility of creating composite mainly from waste materials. The matrix of this composite was prepared from fly ash type F, which was activated by sodium water glass. Wood chips were used as a filler. This thesis includes theoretical and experimental parts. The theoretical part deals with the most important issues of wood composites with an inorganic matrix as well as basic components of investigated composite, ie alkaline activated fly ash and wood. In the experimental part, the fly ash pastes were prepared, from which the most suitable mixture was chosen for the composite preparation. Properties of wood composite with alkali activated fly ash matrix were investigated depending on the dose of wood chips.

Keywords:

Wood composite, fly ash, alkali activation, wood chips

Bibliografická citace VŠKP

BRÝDL, David. *Dřevokompozity s alkalicky aktivovanou popílkovou maticí*. Brno, 2012. 91 s., 2 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité, informační zdroje.

V Brně dne 12.1.2012

.....
podpis autora

Poděkování :

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu RNDr. Pavlu Rovnaníkovi Ph.D. za podporu od zadání práce až po její odevzdání. Dále bych chtěl také poděkovat panu Jakubovi I. za nezištné poskytnutí suroviny užitě v mé diplomové práci. V neposlední řadě chci poděkovat svým blízkým za trpělivost, ochotu a podporu nejen v době tvoření této práce, ale po dobu celého studia.

Obsah

Obsah	7
1 Úvod a cíl práce	9
2 Dřevo	10
2.1 Struktura dřeva	10
2.2 Chemické složení dřeva	10
2.3 Vlastnosti dřeva	11
2.3.1 Fyzikální vlastnosti	11
2.3.2 Mechanické vlastnosti	11
2.4 Dřevní štěrka	12
2.4.1 Dřevní štěrka z odpadů vzniklých při lesní těžbě (zelená štěrka)	12
2.4.2 Dřevní štěrka z odpadů vzniklých při průmyslovém zpracování dřeva	12
3 Alkalicky aktivovaná pojiva a betony	13
4 Alkalické aktivátory	14
4.1 Křemičitan sodný (vodní sklo)	14
4.2 Hydroxid sodný	14
5 Popílký	15
5.1 Vysokoteplotní popílek	15
5.1.1 Vznik popílku	15
5.1.2 Mineralogické a chemické složení popílku	15
5.1.3 Fyzikální vlastnosti popílků	16
5.1.4 Pucolánové a pojivé vlastnosti popílků	16
6 Alkalická aktivace popílků	17
6.1 Hydratace AAP	17
6.2 Tvorba pevné struktury z hydratačních produktů	18
6.3 Ovlivnění reakční kinetiky alkalicky aktivovaných popílků a s tím související zlepšení vlastností výsledných geopolymérů	19
7 Dřevokompozity s anorganickou matricí	21
7.1 Obecné vlastnosti dřevokompozitů s anorganickou matricí	21
7.1.1 Interakce pojiva s plnivem	22
7.1.1.1 Interakce cementu a dřeva	22
7.1.1.2 Interakce anorganického pojiva s papírovými vlákny	24
7.2 Rozdělení dřevokompozitů s anorganickou matricí	25
7.2.1 Cementové desky z dřevní vlny	26
7.2.2 Cementové desky z velkoplošných třísek	28
7.2.3 Desky z dřevní vlny spojené Sorelovým cementem	30
7.2.4 Štěpkocement	31
7.2.5 Cementotřísková deska	34
7.2.6 Sádrotřískové desky	37
7.2.7 Sádroláknité kompozity	40
7.2.8 Vláknocementové kompozity	42
8 Experimentální část diplomové práce	45
8.1 Popílkové pasty	46
8.1.1 Složky popílkových past	46
8.1.1.1 Popílký	46
8.1.1.2 Alkalický aktivátor	46
8.1.2 Složení a vytváření popílkových past	47
8.1.3 Pevnost v tahu za ohybu	49
8.1.4 Pevnost v tlaku	50

8.1.5 Počátek a konec tuhnutí popílkové pasty	52
8.1.6 Porozimetrie popílkových ztvrdlých popílkových past	53
8.1.7 REM snímky (rastrovací elektronová mikroskopie) ztvrdlých popílkových past.....	55
8.1.7.1 REM snímky popílkových past z popílku Dětmárovice.....	55
8.1.7.2 REM snímky popílkových past z popílku Chvaletice	61
8.2 Dřevokompozit s alkalicky aktivovanou popílkovou maticí.....	66
8.2.1 Výběr popílkové matrice pro vytvoření dřevokompozitu	66
8.2.2 Složky kompozitu	71
8.2.2.1 Popílková matrice	71
8.2.2.2 Dřevní štěpka	71
8.2.2.2.1 Objemová hmotnost dřevní štěpky	71
8.2.3 Složení jednotlivých směsí kompozitů	72
8.2.4 Míchání a ošetřování kompozitů	72
8.2.5 Objemová hmotnost dřevokompozitu	74
8.2.6 Pevnost v tlaku dřevokompozitu	75
8.2.7 REM rozhraní matrice/štěpka	77
8.2.8 Součinitel tepelné vodivosti.....	78
9 Závěr.....	80
10 Použitá literatura.....	83
11 Seznam zkratk.....	91
12 Seznam příloh.....	91

1 Úvod a cíl práce

Vysokoteplotní popílek je odpad, který vzniká při spalovacích procesech v elektrárnách a teplárnách. Proces spalování velmi zatěžuje životní prostředí exhaláty a tuhými zbytky po spalování. Odstranění tuhých zbytků po spalování, konkrétně popílků, je možné provést dvěma způsoby. Buď uložením na deponii, haldě, či odvalu, což, i přes veškeré snahy (izolace od podloží, rekultivaci) představuje zátěž pro životní prostředí, nebo jejich dalším využitím. V České republice každý rok vznikne více než 10 milionů tun popílku, ale z tohoto množství je pouze 20 % opětovně využito.^{1,2} Z tohoto důvodu je popílek vhodnou surovinou pro přípravu alternativních stavebních materiálů s novými užitnými vlastnostmi, jako jsou vysoká odolnost vůči agresivnímu prostředí, požární odolnost a trvanlivost. Takovým příkladem může být využití alkalicky aktivovaných popílků, pro tvorbu matrice dřevokompozitu na bázi dřevní štěpky, jako alternativa ke štěpkocementu. Dřevní štěpku je nutné chápat také jako druhotnou surovinu, jelikož se získává především jako odpadní produkt z pilařské výroby. Navíc je dřevo vcelku rychle obnovitelnou surovinou.

Nahrazení cementu alkalicky aktivovaným popílkem by mohlo být výhodné z hlediska ekonomického i ekologického. Kupříkladu roku 2008 bylo na světě při výrobě portlandského cementu vyprodukováno 2,83 miliardy tun CO₂, tedy jedné ze základních příčin skleníkového efektu. Dále ve prospěch myšlenky nahrazení cementu hovoří studie, která prokázala, že z 1 tuny nízkovápenatého popílku lze vytvořit 2,5 m³ geopolymerního betonu, který je vysoce kvalitní a méně nákladný v porovnání s betonem z portlandského cementu.³

Cílem diplomové práce bylo vytvoření kompozitního materiálu, který by se z velké části skládal z odpadu, respektive druhotných surovin. Tento materiál byl označen, jako dřevokompozit s alkalicky aktivovanou popílkovou matricí, a tedy jeho základními složkami jsou vysokoteplotní popílek typu F, který byl alkalicky aktivován sodným vodním sklem, a odkorněná dřevní štěpka

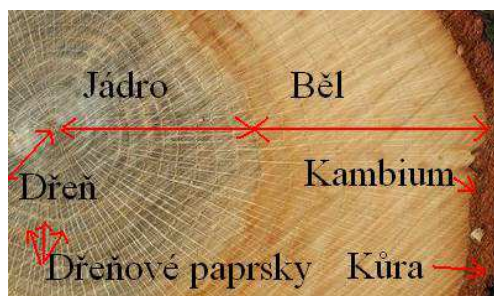
V části diplomové práce, která je literární rešerší, jsou popsány nejrozšířenější typy dřevokompozitů s anorganickou matricí, ale jsou také uvedena základní specifika materiálů použitých při vytváření dřevokompozitů s alkalicky aktivovanou popílkovou matricí. Experimentální část diplomové práce je pak zaměřena na výběr vhodné alkalicky aktivované popílkové matrice a vlastní příprava kompozitu s dřevní štěpkou. Hlavním cílem bylo studium vlivu obsahu dřevní štěpky na mechanické a tepelně izolační vlastnosti dřevokompozitu.

2 Dřevo

Dřevo bylo spolu s kamenem a hlínou jedním z prvních stavebních materiálů. V dnešní době je dřevo užíváno v mnoha formách od konstrukčních prvků, přes kompozitní materiály až po dekorační účely. Hlavní výhodou dřeva je fakt, že patří mezi obnovitelné suroviny, s čímž značně souvisí jeho příznivá cena. Dřevo se dělí dle mnoha kritérií. Základní a všeobecně známě dělení dřeva je dle druhu dřeviny, a to na jehličnaté, listnaté tvrdé a listnaté měkké.

2.1 Struktura dřeva

Struktura dřeva je základní parametr při určování druhu dřeviny a je rozlišována především makrostruktura a mikrostruktura. Makrostruktura dřeva zahrnuje všechny hlavní části dřeviny, tedy kořen, kmen a korunu. Na obrázku 1 je znázorněno složení kmene.⁴



Obrázek 1. Makrostruktura dřeva ⁴

Základními složkami mikrostruktury dřeva jsou buňky, které dále tvoří pletiva. Ve dřevě se nachází 3 základní typy buněk a to parenchymatické a sklerenchymatické buňky a cévy. Parenchymatické buňky mají vyživovací a vodivou funkci. Parenchymatické buňky se dělí se na dřevní, paprskový a dřeňový parenchym. Sklerenchymatické buňky mají vyztužovací funkci. Jsou vyplněny vzduchem a brzy odumírají. U listnatých dřevin jsou nositelem pevnosti dřeva a u jehličnatých dřevin jsou nahrazeny tracheidami. Cévy jsou prázdné, odumřelé, protáhlé buňky, jejichž hlavní funkcí je vést vodu a v ní rozpuštěné anorganické živiny. Dělí se dvou skupin na tracheje (cévy) a tracheidy (cévice). Tracheje tvoří dlouhé články – tzv. vodivé rourky. Tracheidy jsou uzavřené buňky, které dle druhu plní funkci vodivou či vyztužující.⁴

2.2 Chemické složení dřeva

Pomocí chemických prvků lze dřevo popsat jako látku složenou z C (49 %), O (44 %), H (6 %) a N (<1 %). Dřevo je složeno ze 3 částí a to ze sacharidické části, aromatické části a z doprovodných složek. Aromatická a sacharidická část tvoří dohromady 90 až 97 %

stavby dřeva. Sacharidická část se skládá z celulosy a hemicelulos, a aromatická část je tvořena ligninem. Doprovodné složky dřeva jsou anorganické i organické látky. Anorganické složky jsou soli vápníku, draslíku a hořčíku. Mezi organické složky patří sacharidy (škrob), fenolické látky (taniny), alkoholy, bílkoviny, vosky.⁵

2.3 Vlastnosti dřeva

2.3.1 Fyzikální vlastnosti

Základní a nejvíce sledovanou fyzikální vlastností u dřeva je vlhkost. Vlhkostí se rozumí procentuální obsah vody v látce. Voda ve dřevě se dělí do tří skupin na vodu chemicky vázanou, vázanou a volnou.⁴

Objemová hmotnost dřeva je fyzikální vlastnost, jejíž znalost je velice důležitá především při samotném návrhu konstrukčního celku z hlediska velikosti stálého zatížení. V zásadě rozeznáváme dřeviny s nízkou, střední a vysokou objemovou hmotností.⁴

Další důležitou fyzikální vlastností je tepelná vodivost, která udává s jakou rychlostí se materiálem šíří teplo z teplejších do chladnějších částí. Je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti λ (W/mK), který se pohybuje v rozmezí hodnot 0,12–0,45 W/mK. Hodnoty součinitele tepelné vodivosti vybraných dřevin jsou uvedeny v tabulce 1.^{4,6,7}

2.3.2 Mechanické vlastnosti

Dřevo je anizotropní materiál, což znamená, že jeho vlastnosti nejsou ve všech směrech stejné. Mechanické vlastnosti dřeva se určují ve třech směrech – tangenciálním, radiálním a podélném. Při zatěžování dřeva až po mez úměrnosti je napětí přímo úměrné deformaci (platí Hookův zákon). Pokud dojde ke zvětšení napětí, přímá úměra mezi napětím a deformací neplatí, ale dřevo se až po mez pružnosti deformuje elasticky. Za mezí pružnosti nastává plastická deformace dřeva až do meze únosnosti. Dřevo se pod napětím chová visko-elasticky. Viskózní chování znamená, že při konstantním zatížení se deformace v průběhu času zvětšují. Dřevo se ale také chová elasticky (jeho deformace jsou vratné).⁴

Pružnost je mechanická vlastnost dřeva, která patří k hlavním přednostem tohoto materiálu. Pružnost je stanovena modulem pružnosti (E), modulem pružnosti ve smyku (G) a Poissonovými čísly (μ). Modul pružnosti udává vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci a Poissonova čísla představují hodnotu uvažující vliv deformací ve směru kolmém na směr působící síly.⁴

Také pevnost dřeva je velice ceněnou vlastností. Pevností rozumíme takovou velikost

vnitřního napětí, kdy již materiál není schopen adsorbovat a dále přenášet další zatížení, nebo není schopen udržet stabilní tvar. U dřeva se rozeznává několik druhů pevností v závislosti na způsobu namáhání a směru namáhání. Vybrané mechanické vlastnosti a jejich konkrétní hodnoty v závislosti na druhu dřeviny jsou uvedeny v tabulce 1.⁴

Tabulka 1. *Vybrané vlastnosti nejvíce užívaných dřevin*^{6,7}

Vlastnost	Druh dřeviny					
	Smrk	Jedle	Borovice	Modřín	Buk	Dub
Pevnost v tlaku \parallel s vlákny [MPa]	55	50	60	60	65	70
Pevnost v tahu \parallel s vlákny [MPa]	80	70	100	105	120	100
Pevnost v tahu \perp na vlákna [MPa]	3	2	3	2	7	4
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	75	70	100	100	120	110
Pevnost ve smyku \parallel s vlákny [MPa]	7	5	10	9	12	11
Modul pružnosti [GPa]	11	11	12	13,5	16	14
Součinitel tepelné vodivosti [W/mK]	0,12	0,12	0,17	0,15	0,18	0,18

2.4 Dřevní štěpka

Štěpka je strojně zpracovaná dřevní hmota nejčastěji délky 3–250 mm. Získává se z odpadů při průmyslovém zpracování dřeva, z odpadů při lesní těžbě, anebo se získává cíleným zpracováním rychle rostoucích dřevin na štěpku. Dle kvality se štěpka dělí na zelenou, hnědou a bílou.⁸

2.4.1 Dřevní štěpka z odpadů vzniklých při lesní těžbě (zelená štěpka)

Tato dřevní štěpka je strojně zpracovaný odpad z těžby, kmínky z probírek, kousky větví, listů a jehličí (díky tomu se označuje jako zelená štěpka). Vytváří se v délce od 5 do 250 mm. Tato štěpka obsahuje značné množství vody (vlhkost až 55 %) a její objemová hmotnost se pohybuje kolem 300 kg/m³ (dle druhu dřeva). Po přirozeném vyschnutí na slunném místě se objemová hmotnost sníží na cca 250 kg/m³ a vlhkost na 30 %.⁸

2.4.2 Dřevní štěpka z odpadů vzniklých při průmyslovém zpracování dřeva

Tato dřevní štěpka se dělí dle způsobu vzniku a dle kvality. Dle způsobu vzniku rozeznáváme štěpku z pilařských odpadů (vlhkost až 45 %) a štěpku z truhlářské výroby (vlhkost 15 %). Dle kvality rozlišujeme hnědou a bílou štěpku. Hnědá štěpka vzniká z neodkorněných pilařských odřezků a zbytkových částí kmenů. Bílá štěpka se získává výhradně z odkorněného dřeva z pilařské výroby.⁸

3 Alkalicky aktivovaná pojiva a betony

Alkalicky aktivované látky, které se používají, jako součást pojiv jsou dvojího druhu. Prvním z nich jsou latentně hydraulické látky (strusky) a druhým jsou pucolány (popílký, mikrosilika, atd).

První použití alkálie jako složky pojiva se datuje do roku 1930, kdy Kühn vyšetřoval průběh tuhnutí směsi z mleté strusky a roztoku hydroxidu draselného. V roce 1940 provedl Purdon první rozsáhlý laboratorní výzkum slínkového cementu smíšeného se struskou a hydroxidem sodným.⁹

Na konci 50. let Glukhovskij objevil možnosti výroby pojiv z křemičitanů s nízkým, či žádným obsahem vápníku a z roztoků alkalických kovů. Toto pojivo nazval „gruntocement“.¹⁰

Na počátku 80. let 20. století Davidovits shrnul poznatky z několika studií zabývajících se zkoumáním antických betonů a vytvořil pojivo podobné těm, která se vyskytovala v antických betonech. Konkrétně se dané pojivo skládalo z alkálií, směsi páleného kaolinitu, vápence a dolomitu. Toto pojivo nazval geopolymery, jelikož má polymerní strukturu.¹¹

Krivenko o něco později zjistil, že alkálie, křemičitany, hlinitany a hlinitokřemičitany vykazují reakce s popílkou v alkalickém vodním prostředí. Tyto reakce probíhají s jílovými minerály, s hlinitokřemičitanovým sklem přírodního či umělého původu, a to jak bez vápníku, tak i za jeho přítomnosti. Výsledkem zmíněných reakcí jsou vodě odolné, tvrdé hydratované alkalické hlinitokřemičitany, které jsou analogické přírodním zeolitům.¹²

4 Alkalické aktivátory

Jako alkalické aktivátory alkalicky aktivovaných pojiv a betonů bývají nejčastěji užívány látky jako alkalické soli a alkalické hydroxidy. Gluchovsky a kolektiv tyto aktivátory rozdělili do 6 skupin dle jejich chemického složení na alkalické hydroxidy, soli slabých kyselin, křemičitany, hlinitany, hlinitokřemičitany a soli silných kyselin.¹³

Ze všech těchto aktivátorů jsou široce dostupné a ekonomicky nenáročné tyto: NaOH, Na₂CO₃, Na₂O·nSiO₂ a Na₂SO₄. V laboratorních zkouškách se také používají některé draselné složky, avšak jejich případná aplikace je velmi omezena díky jejich špatné dostupnosti a vysoké ceně.⁹

Použití hydroxidů a vodních skel jako alkalických aktivátorů představuje problém v podobě výkvětů na povrchu ztvrdlých alkalicky aktivovaných aluminosilikátů. Tento jev je výraznější při použití aktivátorů na bázi Na v porovnání s aktivátory na bázi K, což je způsobeno větší „pohyblivostí“ sodných iontů v aluminosilikátové matici během zrání.¹⁴

4.1 Křemičitan sodný (vodní sklo)

Křemičitan sodný je koloidní vodný roztok Na₂SiO₃. Vodní sklo se specifikuje pomocí tzv. „silikátového modulu“, který vyjadřuje molární poměr $M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ (nebo K₂O). Běžně vyráběné roztoky křemičitanu sodného mají M_s od 1,6 do 3,85. Křemičitany sodné s rozdílným silikátovým modulem mají rozdílné vlastnosti a mohou mít mnoho rozličných průmyslových využití.⁹

4.2 Hydroxid sodný

NaOH je jedním z hlavních pilířů chemického průmyslu. Komerční NaOH je vyráběn elektrolýzou roztoku NaCl. Kromě tekutého NaOH se vyrábí také pevný, ve formě vloček, kombinovaný a také ve formě pecek. Bezvodý NaOH má hustotu 2,13 g/cm³ při 20 °C a teplotu tání 318 °C.⁹

Často se kombinuje s vodním sklem za účelem snížení jeho silikátového modulu. Pokud se smíchání neprovede přímo ve výrobě, mohou nastat problémy s nepřesností ve výsledném modulu a koncentraci upraveného roztoku.⁹

5 Popílky

Popílky je možné, podle způsobu jejich vzniku rozdělit na umělé (vysokoteplotní a fluidní) a přírodní. Popílky jsou primárně řazeny do skupiny tzv. „pucolánů“, což jsou látky, u kterých je nutno dodat budiče, aby po smíchání s vodou započaly tuhnout a tvrdnout. Avšak tato definice není zcela přesná, jelikož popílky tuhnou a tvrdnou pokud jsou aktivovány alkalickým roztokem a fluidní popílek tuhne a tvrdne již po pouhém smísení s vodou.¹⁵

5.1 Vysokoteplotní popílek

5.1.1 Vznik popílku

Vysokoteplotní popílek vzniká spalováním tuhých paliv při teplotách 1400 až 1600 °C. Při těchto teplotách dochází, dle složení paliv, k následujícím pochodům. Jílové minerály ztrácí vodu a tají, uhličitany se rozkládají na CO₂ a vznikají CaO a MgO, sulfidy oxidují za vzniku oxidů kovů a siřičitanů a oxid křemičitý zůstává chemicky nezměněn.¹⁶

5.1.2 Mineralogické a chemické složení popílku

Zrna popílku vzniklá utuhnutím taveniny obsahují jak skelnou tak i krystalickou fázi. Skelná fáze je tvořena především amorfním SiO₂ a krystalická mullitem 3Al₂O₃·SiO₂, křemenem SiO₂, spinelem, melilitem, magnetitem, gehlenitem.¹⁶ Z chemického hlediska je popílek složen převážně z SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO a dalších složek uvedených v tabulce 2.¹⁷

Tabulka 2. Chemické složení popílku v závislosti na druhu paliva¹⁷

Druh paliva	Složka[%]								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	ZŽ
Bitumenózní uhlí	20–60	5–25	10–40	1–12	0–5	0–4	0–3	0–4	0–15
Sub-bitumenózní uhlí	40–60	20–30	4–10	5–30	1–6	0–2	0–2	0–2	0–3
Lignit	15–45	10–25	4–15	15–40	3–10	0–6	0–4	0–10	0–5

Dle chemického složení se popílky dělí do dvou skupin na popílky typu C a typu F. Dělicím kritériem těchto skupin je procentuální hmotnostní podíl sumy (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃). Popílek C obsahuje min. 50 % hmotnosti dané sumy a popílek F min. 70 % hmotnosti z dané sumy. V podstatě to znamená, že oba popílky se liší obsahem CaO. Popílek typu F vzniká při spalování antracitu a černého uhlí a jeho obsah CaO

nabývá maximálně hodnoty 3 %. Popílek typu C vzniká spalováním mladého hnědého uhlí a lignitu a jeho obsah CaO může dosáhnout hodnoty až 20 %.⁹ Popílek s vysokým obsahem vápníku může obsahovat značné podíly volného CaO, C₃A, C₂S, CaSO₄, MgO, a CaO·3Al₂O₃·SO₃, které jsou zjištělné pomocí XRD.^{18,15}

5.1.3 Fyzikální vlastnosti popílků

Zrna popílků jsou převážně kulovitěho tvaru o průměru 0,001 až 0,1 mm, jsou plná nebo dutá, barvy šedé až béžové. Popílky mají značně rozdílné jak objemové hmotnosti, tak i hustoty. Je to způsobeno přítomností cenosfér, a také rozdílností ve složení, zvláště v obsahu železa a uhlíku. Průměrná hustota nemletého popílku kolísá mezi 1900 a 2800 kg/m³ a objemová hmotnost od 540 do 860 kg/m³.¹⁹ Měrný povrch popílků dle Blainea nabývá hodnot 200–300 kg/m³. Ztráta žíháním popílku by neměla přesáhnout 7 %, protože obsah spalitelných látek v popílku narušuje proces tuhnutí a tvrdnutí čerstvého betonu a snižuje trvanlivost betonu.¹⁷

5.1.4 Pucolánové a pojivé vlastnosti popílků

Popílky třídy F, díky malému obsahu CaO, mají malé či žádné pojivé vlastnosti. Pucolánová aktivita popílků třídy F je určena především vlastnostmi hlinitokřemičitanového skla a velikostí částic popílku. Popílky třídy C obsahují kromě skelné fáze, také značnou část fáze krystalické jako CaO, C₃A, C₂S, CaSO₄, MgO, a CaO·3Al₂O₃·SO₃, které mají pojivé vlastnosti.¹⁵ Hydratační chování C₃A a C₂S v popílku je stejné jako v portlandském cementu.²⁰ Mnoho odborníků často přičítá pojivé vlastnosti popílků třídy C také jejich skelné fázi. Skelná fáze s vysokým obsahem vápna také vykazuje velmi vysokou hydratační reaktivitu.²¹

6 Alkalická aktivace popílků

Počátky využívání alkalicky aktivovaných pojiv včetně popílků spadají do rozmezí 50. a 60. let minulého století. Od té doby využívání alkalicky aktivovaných popílků (dále jen AAP) zaznamenalo velký rozvoj díky pochopení struktury a reakčních pochodů v závislosti na různých činitelích.⁹

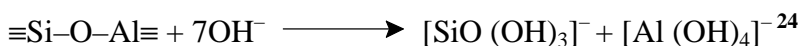
Rozdělení popílků na dva typy C a F, dle chemického složení, úzce souvisí i s jejich pojivými schopnostmi. Díky rozdílnému chemickému a mineralogickému složení těchto dvou typů popílku lze očekávat rozdílné chování AAP z nich připravených. Skutečností však je, že i stejný typ popílku z rozdílných zdrojů, či ze stejného zdroje, ale z rozdílného uhlí může vykazovat jiné vlastnosti.⁹

6.1 Hydratace AAP

Hydratace je všeobecně schopnost dané látky reagovat s vodou. V případě AAP je hydratací myšlena reakce popílku s vodou za přítomnosti aktivátoru. Reakce popílku s alkáliemi je za pokojové teploty velmi pomalá, ale je možné ji citelně urychlit se zvyšující se teplotou. Reakční proces popílku s alkáliemi zahrnuje 3 fáze jimiž jsou počáteční rychlé rozpouštění, indukční perioda a poslední je exotermická perioda, při níž dochází k tvorbě geopolymerní sítě.⁹

Během první fáze dochází k rozbíjení kovalentních vazeb Si–O–Si a Al–O–Si v popílku. Po tomto rozrušení vazby přejdou křemičitanové a hlinitanové ionty do roztoku. Následně v druhé fázi dochází k hromadění produktů vzniklých destrukcí struktury popílku a vytvoření amorfního gelu. Posledním krokem je konsolidace struktury.⁹ Davidovits²² zjistil, že jednotlivé reakční kroky (rozpuštění, indukční perioda, tvorba pevné struktury) se překrývají navzájem.²²

Van Jaarsveld a kolektiv²³ upozornili na fakt, že rozrušení kovalentní vazby popílku se děje pouze na jeho povrchu, jelikož množství rozpuštěných křemičitých a hlinitých iontů nezáleží na velikosti částic popílku, ale na tom jestli daný alkalický aktivátor je na bázi K⁺ či Na⁺.²³ Za působení alkálií jsou kovalentní vazby Si–O–Si a Al–O–Si v amorfních hlinitokřemičitanech depolymerizovány na monosilikáty a hlinitany takto:



Rozpuštěné monosilikáty a hlinitany spolu opět kondenzují a vytváří amorfni semi-krytalické 3D hlinitokřemičitanové struktury z následujících typů řetězců:⁹

$$M_n(-(\text{Si-O}_2)_z-\text{Al-O})_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$$

6.2 Tvorba pevné struktury z hydratačních produktů

Na počátku tuhnutí se ve struktuře AAP nejvíce nachází metastabilní hlinitanová fáze. Následně v období zrání nastává rozvoj více stabilní křemičitanové fáze (zeolitický prekurzor).²⁶ U AAP aktivovaných pomocí NaOH, se nachází kromě zeolitického prekurzoru i stopová množství krystalických složek jako hydroxysodalit, herschelit a gismondin.²⁷ V závislosti na druhu popílku a jeho konkrétním složení může výsledná matrice obsahovat také C-S-H, portlandit, hydrogranát.²⁸

V případě, že AAP zrají za hydrotermálních podmínek, dochází k tvorbě krystalických produktů. Těmito krystalickými produkty jsou zeolity.²⁶ Charakter zeolitů je především utvářen povahou surovin, dobou hydratace, a teplotou zrání.²⁹

6.3 Ovlivnění reakční kinetiky alkalicky aktivovaných popílků a s tím související zlepšení vlastností výsledných geopolymérů

Základním faktorem, který ovlivní reakční kinetiku a vlastnosti AAP, jsou vlastnosti surového popílku a ty se liší v závislosti na typu a stupni drcení uhlí, ale také na rychlosti ochlazování kouřových plynů. Fernandez-Jimenez a kol. stanovili, že popílků by měly splňovat některé základní vlastnosti, jako například obsah reaktivního SiO_2 (40–50 %), obsah Fe_2O_3 (<10 %) či ztráta žháním do 5 %.^{30,31}

Reakční kinetika AAP se dá také ovlivnit mechanickou aktivací, čímž se zabývali Temuujin a kolektiv.³² Při mletí se sníží střední velikost zrn popílku o polovinu a popílek ztratí kulovitou morfologii. Výsledné pevnosti ukázaly, že mletím je možné zvýšit pevnost až o 180 % díky zvětšení měrného povrchu. Ke zvýšení pevnosti došlo i přesto, že se zhoršila zpracovatelnost, zvýšila se spotřeba vody a snížila koncentrace alkalického aktivátoru.³²

Další možností ovlivnění kinetiky je správná dávka a druh aktivátoru. Obecně s koncentrací aktivátoru stoupá rychlost alkalické reakce.³³ Rychleji proběhne alkalická reakce za použití křemičitanu draselného nežli křemičitanu sodného a totéž platí při použití hydroxidů, tedy s draselným hydroxidem proběhne alkalická reakce rychleji, nežli při použití hydroxidu sodného.³⁴ Velmi důležitý pro reakční kinetiku a vývoj pevností AAP je silikátový modul vodního skla, ale názory na jeho optimální hodnotu se různí. Někteří autoři považují za ideální hodnotu 1,5³⁵ a jiní upřednostňují hodnotu nižší. Například Xi a Xie zjistili,³⁶ že snížení modulu vodního skla z hodnoty 1,64 na hodnotu okolo 1,00 způsobí zkrystalizování nadbytečného či nezreagovaného metakřemičitanu sodného. Vzniklé deskovité krystaly zvyšují pevnost AAP, což vysvětluje stoupající pevnost popílkové matrice spolu s klesajícím modulem vodního skla.³⁶

Rychlost nárůstu pevnosti v raném období zrání AAP stoupá společně s nárůstem teploty zrání. Neoptimálnější jsou teploty okolo 90 °C.³³ Pro dosažení vysokých pevností i v delším časovém horizontu je nutné, aby popílková pasta zrála po dobu 48 h za teploty 60 °C.³⁷

Novým trendem v ovlivnění reakční kinetiky je tepelné vytvrzování pomocí mikrovln. Pokud bychom porovnali vzorky vytvrzované mikrovlnami po dobu 2 h výkonem 240 W a vzorky vytvrzované hydrotermálně 48 h při teplotě 75 °C nenalezneme mezi jejich pevnostmi žádný rozdíl, jak ve své studii uvádí Somaratna a kolektiv.³⁸

Velice jednoduchým, ale ne vždy finančně nejvýhodnějším způsobem jak upravit reakční

kinetiku a mechanické vlastnosti AAP je přidání různých chemických látek. Chloridy a uhličitany zvyšují ranné pevnosti AAP a v případě uhličitánů pevnosti rostou i v dlouhodobém měřítku.³⁹

Dosud nepříliš prozkoumanou možností jak ovlivnit kinetiku a vlastnosti AAP, je užití komerčního urychlovače tuhnutí a tvrdnutí betonu. S úspěchem byl použit hlinitan vápenatý $C_{12}A_7$ (mayenit) jehož ideální dávka činila 20 % z hmotnosti popílku.⁴⁰

Faktorem, který není příliš zřetelný, ale ovlivňuje reakční kinetiku AAP je karbonatace. CO_2 způsobuje ve struktuře AAP vznik hydrogenuhličitanu sodného, jehož přítomnost vede ke snížení pH celé pasty a tím i ke snížení účinnosti alkalické aktivace.⁴¹

7 Dřevokompozity s anorganickou maticí

Pod pojmem dřevěné kompozity s anorganickou maticí se skrývají materiály vytvořené vždy alespoň ze tří složek a to pojiva (cement, sádra, Sorelův cement), plniva, které je někdy zároveň i výztuží a to ve formě rozdělené dřevní hmoty či papíru a vody, která je reaktantem. Dalšími složkami mohou být přísady, které plní funkci katalyzátorů, a v neposlední řadě tyto kompozity obsahují výztuž, pokud jí není už samotné plnivo.^{42,43}

Naprosté prvopočátky vytváření dřevokompozitů s anorganickou maticí spadají do přelomu 19. a 20. století. Za první produkt tohoto typu je považována deska z dřevěných hoblin pojená sádrrou, která vznikla v tehdejším Rakousku-Uhersku. V roce 1908 byl patentován výrobek skládající se ze Sorelova cementu a dřevní vlny s obchodním názvem Heraklit. O několik let později byl Sorelův cement v Heraklitové desce nahrazen portlandským cementem a vznikla cementová deska z dřevní vlny.⁴⁴

Postupem času začaly na trhu přibývat produkty z dřevokompozitů pojených anorganickou maticí. V roce 1953 vyvinula společnost Durisol štěpkocementové tvárnice sloužící jako ztracené bednění. Roku 1967 byla ve Švýcarsku vytvořena linka na výrobu cementotřískových desek s obchodním názvem Duripanel a následně došlo k rozšíření výroby po celém světě.^{45,46}

V 60. a 70. letech minulého století se vývoj dřevokompozitů s anorganickou maticí značně urychlil, zejména díky snaze o nalezení alternativy za výrobky s azbestovými vlákny, jelikož byla potvrzena jejich zdravotní závadnost. Postupem času byla azbestová vlákna nahrazena buničinou či rozvlákněným papírem. Vývoj jednotlivých druhů těchto kompozitů probíhal víceméně současně.⁴⁷

7.1 Obecné vlastnosti dřevokompozitů s anorganickou maticí

Dřevokompozity s anorganickou maticí spojuje několik podobných vlastností, z nichž tou nejdůležitější je interakce pojiva s plnivem a od ní se odvíjí většina ostatních vlastností. Dále mezi nejvíce sledované vlastnosti patří požární odolnost, mechanické (pevnost v tlaku, tahu za ohybu) a fyzikální vlastnosti (tepelná vodivost, navlhavost).⁴⁷ Jednotlivé vlastnosti dřevokompozitů s anorganickou maticí se podle druhu výrobku a výrobní technologie pohybují v určitých mezích a nelze je tudíž paušalizovat. Jediná vlastnost, která je neměnná v závislosti na druhu výrobku a výrobní technologii je interakce pojiva s plnivem. Avšak je samozřejmé, že tato vlastnost je závislá na vstupních surovinách a na jejich úpravě.⁴⁷

7.1.1 Interakce pojiva s plnivem

Interakcí pojiva s plnivem jsou ovlivněny všechny vlastnosti dřevokompozitů s anorganickou maticí, a tudíž je tato problematika v oblasti vývoje a zdokonalování tohoto typu materiálu nejvíce studována. Interakce portlandského cementu s plnivem na bázi dřeva je odvislá od použitých surovin. Všeobecně známa je retardace portlandského i Sorelova cementu různými látkami nacházejícími se v dřevní hmotě.^{48,49} Naproti této skutečnosti vystupuje fakt, že je také nutné ochránit papírová vlákna před navlháním a vysycháním. Navíc v silně alkalickém prostředí se z neošetřených papírových vláken uvolňuje celulóza a následným hydrolytickým štěpením vznikají nižší cukry a jejich kyseliny.^{50,51} Naopak při produkci sádrovláknitých či sádrotrískových kompozitů není nutné plnivo na bázi dřeva jakkoliv ošetřovat, jelikož na hydrataci sádry má pouze malý vliv tříslovina.^{52,53}

7.1.1.1 Interakce cementu a dřeva

Problémem inhibice hydratace cementu látkami obsaženými ve dřevě se zabývalo a stále zabývá mnoho autorů. Obecně je cement více inhibován tvrdými dřevinami.^{42,54} Například Papadopoulos⁵⁵ stanovil index zpomalení hydratace cementu, dle kterého jednotlivé dřeviny dělí jak je možné vidět v tabulce 3 a příklady indexu zpomalení hydratace konkrétních dřevin jsou uvedeny v tabulce 4. Index zpomalení hydratace se vypočte podle vzorce:

$$I = 100 [((t_2 - t'_2) / t'_2) \times ((T'_2 - T_2) / T'_2) \times ((S'_2 - S_2) / S'_2)]$$

t_2 – čas který uplyne od smíchání vody cementu a dřeva do doby, kdy je dosaženo maximální teploty směsi při hydrataci

t'_2 – čas který uplyne od smíchání vody a cementu do doby, kdy je dosaženo maximální teploty směsi při hydrataci

T_2 – maximální teplota dosažená při hydrataci ve směsi obsahující dřevo

T'_2 – maximální teplota dosažená při hydrataci ve směsi neobsahující dřevo

S_2 – poměr teploty T_2 a času t_2

S'_2 – poměr teploty T'_2 a času t'_2

Tabulka 3. *Stupně indexu zpomalení hydratace cementu dřevinami*⁵⁵

Index zpomalení hydratace I [%]	Stupeň klasifikace
< 10	nízká
= 10-50	střední
= 50-100	vysoká
> 100	extrémní

Tabulka 4. *Index zpomalení hydratace cementu jednotlivých dřevin*⁵⁵

Druh dřeviny	Index zpomalení hydratace [%]
Cypřiš	57,1
Buk	52,2
Habr	39,1
Borovice	27,3
Javor	22,2
Jedle	16,5
Bříza	11,5
Topol	7,4

Čím nižší je index zpomalení hydratace, tím vyšší je kompatibilita cementu s dřevními částicemi. Obecně lze říci, že pokud je chemický proces hydratace cementu bez výraznějších změn po přidání dřeva, lze hovořit o kompatibilitě.⁵⁶ Kompatibilita klesá se stoupajícím obsahem vyluhovatelných látek ve dřevě, jako jsou terpenoidy, mastné kyseliny, třísloviny, tuky, ale hlavně sacharidy.⁵⁷

Tuky a terpenoidy nepůsobí přímo na hydrataci cementu, ale kolem dřevěných vláken vytvoří nepropustný film, který brání interakci mezi maticí a plnivem, což v konečném důsledku znamená, že vzniklý kompozit je málo kompaktní.⁵⁸

Sacharidy způsobují zpomalení hydratace cementu následujícím způsobem. Místa, kde se tvoří zárodky CSH gelu, jsou původně kladně nabitá, avšak v případě přítomnosti sacharidů jsou tato místa rychle obsazena aniony sacharidů a tím je celá hydratace zpomalena, případně zastavena.⁵⁹ Avšak všechny cukry obsažené ve dřevě nemají stejný retardační účinek. Walter⁶⁰ zkoumal účinky jednotlivých druhů sacharidů na hydrataci portlandského cementu a rozdělil sacharidy do 3 skupin, jak je vidět v tabulce 5.

Tabulka 5. Rozdělení cukrů dle retardačního účinku na hydrataci cementu⁶⁰

Bez retardačního účinku	S retardačním účinkem	Se silným retardačním účinkem
a-methylglucosid	glukóza	sacharóza
trehalóza	maltóza	rafinóza
	laktóza	
	celobióza	

Pro odstranění inhibičního účinku dřeva na hydrataci cementu bylo vyvinuto několik metod, z nichž některé jsou účinné a jiné nikoli. Tyto metody jsou v podstatě založeny na třech mechanismech. První mechanismus spočívá v úpravě či ošetření samotného dřevního plniva,⁵⁰ druhý mechanismus je založen na přidavku látek, které urychlí celý hydratační proces (urychlovače)⁶¹ a třetí mechanismus je nejjednodušší, a také nejméně ekonomicky náročný. Spočívá buď v povaření dřeva a nebo v jeho máčení ve vodě o pokojové teplotě.⁶²

Možností eliminovat inhibiční účinky dřeva se zabýval Olorunnisola⁶¹ a zjistil, že je možné značně omezit účinek těchto zpomalovacích látek uvolňovaných ze dřeva užitím urychlovače CaCl_2 . Současně je nutné podotknout, že přidavek tohoto urychlovače má negativní vliv na některé vlastnosti vzniklého kompozitu, konkrétně na pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a sorpční vlastnosti.^{42,63} Rozsáhlou studii zaměřenou na nalezení vhodných urychlovačů tuhnutí směsi cementu s modřínem provedli Zhengtian a Moslemi.⁶⁴ Zkoumali 30 organických i anorganických sloučenin. Nejlepších výsledků dle jejich studie dosahovali chloridy, sodné a draselné vodní sklo, síran železnatý a dusičnan železitý.⁶⁴ K ošetření surových dřevěných vláken se nejvíce užívá křemičitanu sodného (vodní sklo) a síranu hlinitého.^{45,65}

7.1.1.2 Interakce anorganického pojiva s papírovými vlákny

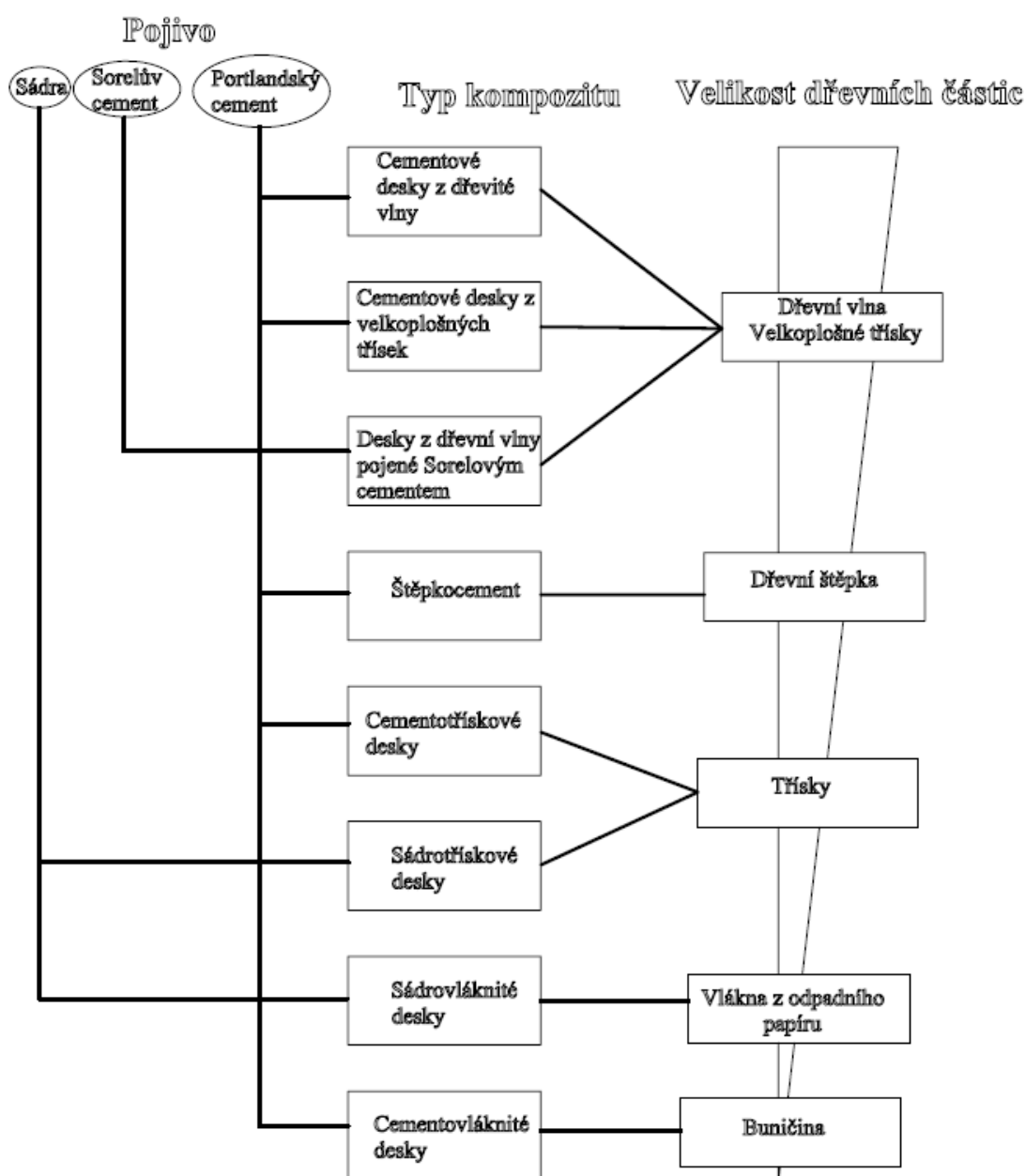
Problém kompatibility papírových vláken s cementovou maticí je řešen z důvodu omezení absorpce vlhkosti vlákny, zabránění uvolňování zbytků hemicelulóz z papírových vláken a zabránění štěpení celulózy v alkalickém prostředí na nižší cukry.^{50,51} Nejvíce užívanými látkami k ošetření papírových vláken jsou silany a vodní skla.^{50,66,67}

Díky ošetření celulóзовých vláken, výsledný kompozit často dosahuje výrazně příznivějších vlastností. Například při ošetření vláken pomocí akrylu bylo zjištěno zlepšení pevnosti v tlaku a houževnatosti. Naopak pevnost v tahu za ohybu se díky ošetření akrylem nezvýšila, ba naopak klesala.⁵¹ Pehanich a kolektiv⁵⁰ se zabývali tím, jaký vliv bude mít

ošetření vláken pomocí vodních skel, na vlastnosti výsledných vláknocementových kompozitů. Z jejich výsledků vyplývá, že ošetření papírových vláken pomocí křemičitanu sodného i pomocí křemičitanu draselného má na vlastnosti vláknocementových kompozitů podobný vliv jako ošetření pomocí silanů.⁵⁰

7.2 Rozdělení dřevokompozitů s anorganickou maticí

Dřevokompozity s anorganickou maticí je možno rozdělit v závislosti na druhu pojiva a na velikosti dřevěných částic jak je vidět na obrázku 2.⁶⁸

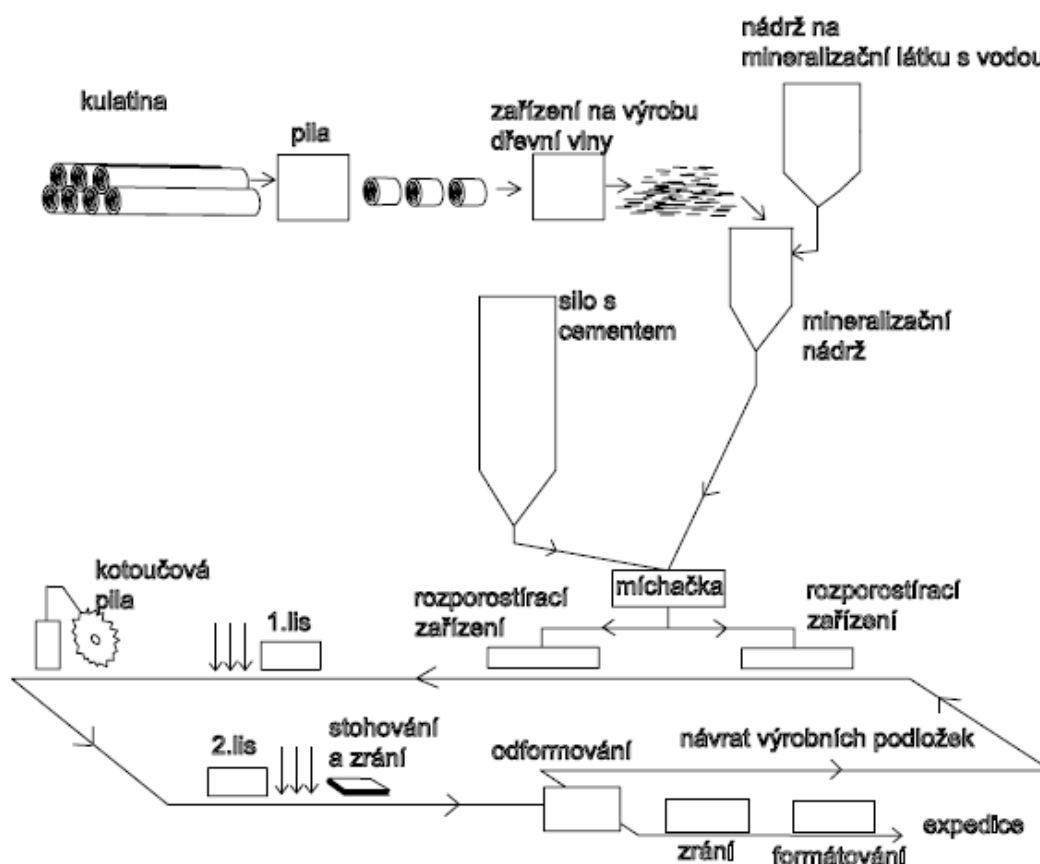


Obrázek 2. Rozdělení dřevokompozitů s anorganickou maticí⁶⁸

7.2.1 Cementové desky z dřevní vlny

Výroba cementových desek z dřevní vlny započala několik let po výrobě desky z dřevní vlny pojené Sorelovým cementem. Za více než 70 let prošla cementová deska z dřevní vlny značným vývojem, zejména co se týká rozmanitosti vyráběných prvků a možnosti aplikace. Nejprve se užívaly jako ztracené bednění, dále jako obklady do prostředí se zvýšenou vlhkostí. Postupem času se z nich začaly vytvářet sendvičové panely s jádrem z polystyrenu či polyuretanu.^{68,69}

Cementové desky z dřevní vlny se skládají z dřeva ve formě vlny, látek pro mineralizaci dřevní vlny, portlandského/bílého cementu a vody. Dřevní vlna je strojně rozdružené dřevo ve formě tenkých provazců, dlouhých až 250 mm. Roztok pro mineralizaci dřevní vlny se nejčastěji skládá z křemičitanu sodného a chloridu hořečnatého.⁴⁹



Obrázek 3. Schématické znázornění výrobního procesu cementové desky z dřevní vlny⁴⁹

Výroba cementových desek z dřevní vlny je zobrazena na obrázku 3. Prvním výrobním krokem je rozřezání odkorněné kulatiny a vytvoření dřevní vlny ve speciálním stroji. Následně je vlna máčena v mineralizačním roztoku, se kterým společně putuje do

míchačky, kde je přidán cement. Po té následuje rozprostírání, lisování v několika stupních, odformování a zrání.⁴⁹

Cementové desky z dřevní vlny vynikají celou řadou vlastností, díky nimž jsou oblíbeným materiálem. Tento materiál je klasifikován jako těžce zápalný,⁷⁰ a také velmi odolný vůči vlhkosti, termitům a je mrazuvzdorný. Díky své nízké objemové hmotnosti dosahuje nízké hodnoty součinitele tepelné vodivosti a je řazen mezi tepelné izolanty. Desky z cementu a dřevní vlny jsou dobrým akustickým izolantem, především výborně pohlcují zvuk díky členitému povrchu. Nevýhodou těchto desek je malá pevnost a to především pevnost v tlaku. Avšak v případě velkorozměrových stěnových dílců je tento nedostatek odstraněn díky velké tloušťce panelů. Hodnoty vybraných vlastností cementových desek z dřevní vlny jsou uvedeny v tabulce 6.⁴⁹

Tabulka 6. *Vybrané vlastnosti cementových desek z dřevní vlny*⁴⁹

Vlastnost -mechanická, fyzikální, chemická	Hodnota
Hořlavost	B1 dle DIN 4102
Objemová hmotnost	360–570 kg/m ³
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,09 W/mK
Součinitel zvukové pohltivosti α_N	0,40–0,87
Pevnost v tlaku	0,15–0,20 MPa
Pevnost v tahu za ohybu	0,4–1,7 MPa

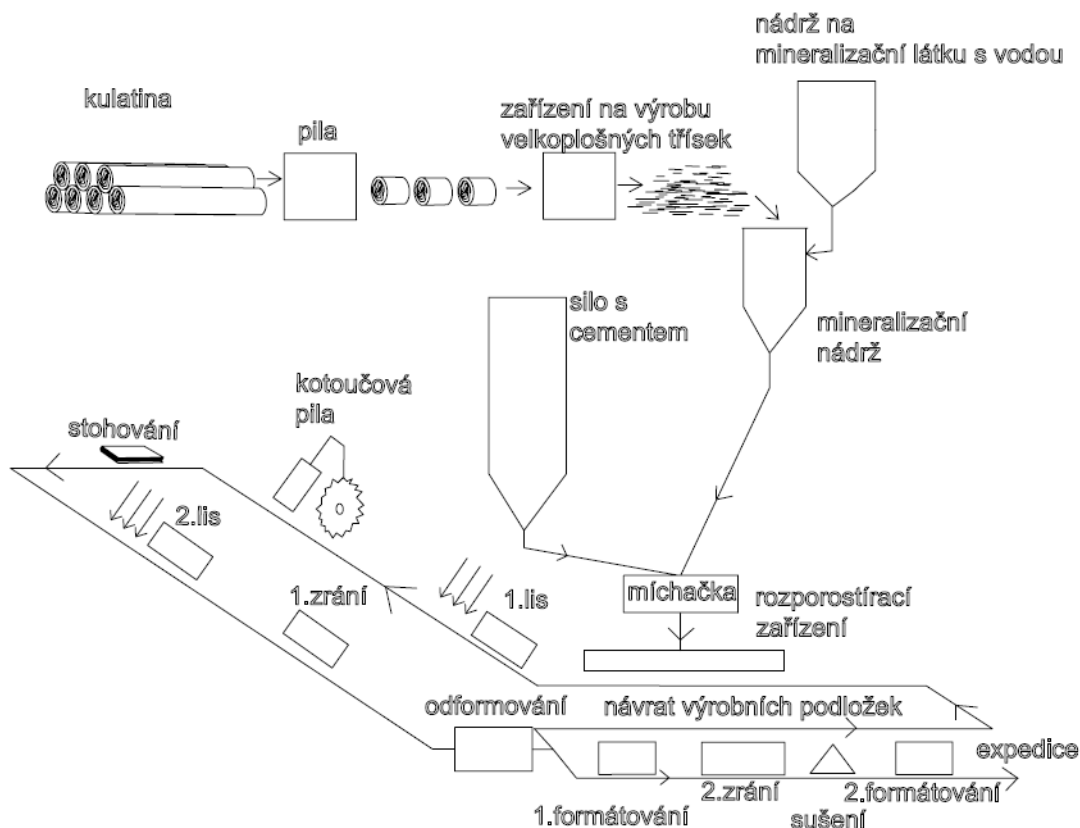
Z dřevní vlny stmelené cementem se vyrábějí především desky, sendvičové panely, protihlukové obklady a nově také velkorozměrové stěnové dílce. Obyčejné desky se užívají především jako ztracené bednění, tepelná izolace, podhledy a akustická izolace. Z desek se vyrábí také sendvičové panely, jejichž jádro tvoří pěnový polystyren, polyuretan či minerální vlna. Pro náročnější aplikace se užívají desky s vysokou hustotou, které bylo docíleno při výrobě díky vyššímu lisovacímu tlaku.⁴⁹ Díky schopnosti pohlcovat zvuk, jsou z tohoto materiálu vyráběny desky, které se montují na dřevěné, či železobetonové stěny a vytváří tak protihlukové bariéry. Novinkou je výroba velkorozměrových stěnových dílců. Které jsou produkovány v tloušťce do 500 mm, maximální délka dílců je 6 m a výška 3 m. Z těchto dílců se sestavují obvodové stěny jednopodlažních objektů. Výhodou tohoto systému jsou malé náklady na dopravu, rychlá a jednoduchá montáž. Obvodové stěny vytvořené z těchto panelů není třeba už jakkoliv doplňovat izolací.⁷¹

7.2.2 Cementové desky z velkoplošných třísek

Cementové desky z velkoplošných třísek jsou výsledkem několik desítek let trvajícího zdokonalování dřevěných kompozitů s anorganickou maticí. V podstatě se jedná o modifikaci OSB desek, které jsou díky organickému pojivu více náchylné na poškození dřevokazným hmyzem a na změny vlhkosti. Tyto nedostatky OSB desek byly odstraněny vyvinutím cementových desek z velkoplošných třísek, které v dnešní době konkurují také cementotřískovým deskám, jež zdobí mnohem delší historie.⁶⁹

Základní surovinou pro výrobu tohoto materiálu jsou velkoplošné třísky, jejichž rozměry mohou být variabilní. Avšak jsou specifické tím, že délka a šířka jasně převyšují tloušťku třísek. Dále je při výrobě užit portlandský cement, voda a mineralizační látka. Stejně jako v případě cementových desek z dřevní vlny, i zde je dřevní výplň nejčastěji mineralizována roztokem křemičitanu sodného.⁴⁴

Výrobní proces je velice podobný výrobě cementových desek s dřevní vlnou. Celá výroba začíná vytvořením velkoplošných třísek z kulatiny na speciálním stroji. Následně jsou třísky mineralizovány a smíchány s cementem. Po té je směs rozprostřena na výrobní podložky, lisována, řezána, stohována, sušena a formátována do podoby výsledného produktu. Celý proces je uveden na obrázku 4.⁴⁹



Obrázek 4. Schéma výrobního procesu cementových desek z velkoplošných třísek⁴⁹

U cementových desek z velkoplošných třísek je dosahováno jedněch z nejpříznivějších vlastností ze všech dřevokompozitů s anorganickou maticí. Důvodem je fakt, že tyto desky vznikly na základě poznatků z produkce dřevokompozitů s organickým pojivem i dřevokompozitů s anorganickou maticí. Oproti jiným dřevokompozitům s anorganickou maticí je tento materiál méně požárně odolný. Dle DIN 4102⁷⁰ je zařazen mezi těžce zápalné materiály. K přednostem cementových desek z velkoplošných třísek patří nízká lineární roztažnost při změně vlhkosti, která je nižší než u cementotřískových desek, což je způsobeno orientací velkoplošných třísek. Cementové desky z velkoplošných třísek jsou mrazuvzdorné a plně odolné vůči povětrnostním vlivům, dřevokazným houbám a hmyzu. Díky příznivým fyzikálním vlastnostem, lze říci, že cementové desky z velkoplošných třísek jsou velice trvanlivým materiálem. Co se týče tepelně i akusticky izolačních vlastností, je tento materiál srovnatelný s cementotřískovými deskami. Jedná se o vcelku dobrý zvukově izolační materiál, ale zároveň se jedná o materiál s vyšším součinitelem tepelné vodivosti a z tohoto důvodu není řazen mezi tepelné izolanty. Objemová hmotnost cementových desek z velkoplošných třísek je velmi podobná hodnotě objemové hmotnosti desek cementotřískových. Nejvíce ceněnou vlastností těchto desek je jejich vysoká pevnost, zejména pevnost v tahu za ohybu. Mezi příznivé vlastnosti tohoto materiálu patří také nízké pořizovací náklady, malé nároky na pracovní sílu a technologické vybavení při aplikaci.⁶⁹ Vybrané vlastnosti s příslušnými hodnotami jsou uvedeny v tabulce 7. Přídavkem urychlovače tvrdnutí cementu, konkrétně CaCl_2 , jak ve svém výzkumu uvádí Ashori a kolektiv,⁶² mohou být zlepšeny vlastnosti cementových desek z velkoplošných třísek. Zjistili, že přídavek chloridu vápenatého má velice příznivý vliv na fyzikální i mechanické vlastnosti.⁶²

Tabulka 7. *Vybrané vlastnosti cementových desek z velkoplošných třísek*⁶⁹

Vlastnost -mechanická, fyzikální, chemická	Hodnota
Hořlavost	B1 dle DIN 4102
Objemová hmotnost	1100 kg/m ³
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,21 W/mK
Pevnost v tahu za ohybu	20 MPa

Díky svým skvělým vlastnostem mohou být cementové desky z velkoplošných třísek používány jak v interiéru tak exteriéru. Jelikož se jedná o cenově dostupný materiál, je v rozvojových zemích užíván pro stavbu nízkonákladových domů. To znamená, že desky slouží jako obvodové zdi a střešní krytina je také z tohoto materiálu a to ve formě vlnité

desky či šindele. V průmyslově rozvinutých zemích se cementové desky z velkoplošných třísek užívají zejména jako ztracené bednění, pro podlahové konstrukce, protipožární konstrukce a obklady. V menší míře se aplikují jako střešní desky, šindele, zvuková izolace a také ve formě prefabrikovaných nízkonákladových domů.⁴⁹

7.2.3 Desky z dřevní vlny pojené Sorelovým cementem

Desky z dřevní vlny pojené Sorelovým cementem jsou známy již od počátku minulého století. Spojením Sorelova cementu a dřeva vzniká materiál s velmi příznivými vlastnostmi hlavně díky schopnosti tohoto pojiva pojmout velké množství plniva. Velkou výhodou je, že Sorelův cement dosahuje vysokých pevností, je i částečně pružný a ve spojení s pružným dřevem vzniká materiál, který se chová velmi kompaktně. Dnes je tento materiál užíván zejména jako zvukově izolační desky, nebo ve formě sendvičových panelů s jádrem například z polystyrénu.⁷²

Hlavními složkami desek z dřevní vlny pojené Sorelovým cementem jsou, jak vyplývá z názvu, dřevo ve formě vlny, Sorelův cement, voda a mineralizační látka, jelikož působení různých rozpustných látek obsažených ve dřevě má podobný retardační efekt na hydrataci Sorelova cementu, jako tomu je u běžného portlandského cementu.^{49,73}

Výroba desek z dřevní vlny pojené Sorelovým cementem je prakticky totožná s výrobou desek z dřevní vlny pojených portlandským cementem. Celý proces začíná rozřezání kulatiny a vytvoření dřevní vlny ve speciálním stroji. Dále pokračuje máčením vlny v mineralizačním roztoku, se kterým společně putuje do míchačky, kde je přidáno pojivo. Po té následuje rozprostírání, lisování, odformování a zrání.⁴⁹

Desky z dřevní vlny pojené Sorelovým cementem se vyznačují nízkou objemovou hmotností. Jedná o materiál s dobrými vlastnostmi v rámci požární bezpečnosti, jelikož je klasifikován jako těžce hořlavý.⁷⁴ Dále jsou výbornými tepelnými i zvukovými izolanty. I když mechanické vlastnosti nejsou u tohoto typu materiálu příliš důležité, je nutno zmínit, že pevnost v tlaku i tahu za ohybu jsou více než dostatečné. Tento materiál bylo dříve možno používat pouze pro aplikace v interiéru, z důvodu jímání vlhkosti, ale díky zkvalitnění Sorelova cementu, není již tak náchylný na zvýšenou vlhkost. Vybrané fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti desek z dřevní vlny pojené Sorelovým cementem jsou uvedeny v tabulce 8. Stejně jako všechny dřevokompozity s anorganickou maticí, i desky z dřevní vlny pojené cementem jsou nenáročné na mechanizaci při výstavbě díky nízké hmotnosti prvků a snadného opracování ručními nástroji. Bohužel jejich nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady.^{72,73,75}

Tabulka 8. Vybrané vlastnosti desek z dřevní vlny pojené Sorelovým cementem ^{72,73}

Vlastnost -mechanická, fyzikální, chemická	Hodnota
Hořlavost	B-s1, d0 – dle ČSN EN 13501-1+A1
Objemová hmotnost	400–800 kg/m ³
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,09 W/mK
Součinitel zvukové pohltivosti α_N	0,15–0,45
Pevnost v tlaku	2,4 MPa
Pevnost v tahu za ohybu	0,3–1,7 MPa

Užití desek z dřevní vlny pojených Sorelovým cementem se změnilo, spolu se zlepšením odolnosti Sorelova cementu proti vlhkosti. Původně byly desky užívány jako zvukové izolanty proti vzduchové neprůzvučnosti, jako protipožární obklady stěn a stropů a vnitřní dělicí příčky. Dnes se jejich využití rozšířilo na vytváření ztraceného bednění, vnější opláštění budov a užívají se například jako zvuková izolace v krytých plaveckých bazénech. V neposlední řadě se z nich vytváří sendvičové panely, s jádrem z velice dobrého tepelného izolantu, které slouží jako tepelná izolace či ztracené bednění.^{72,73}

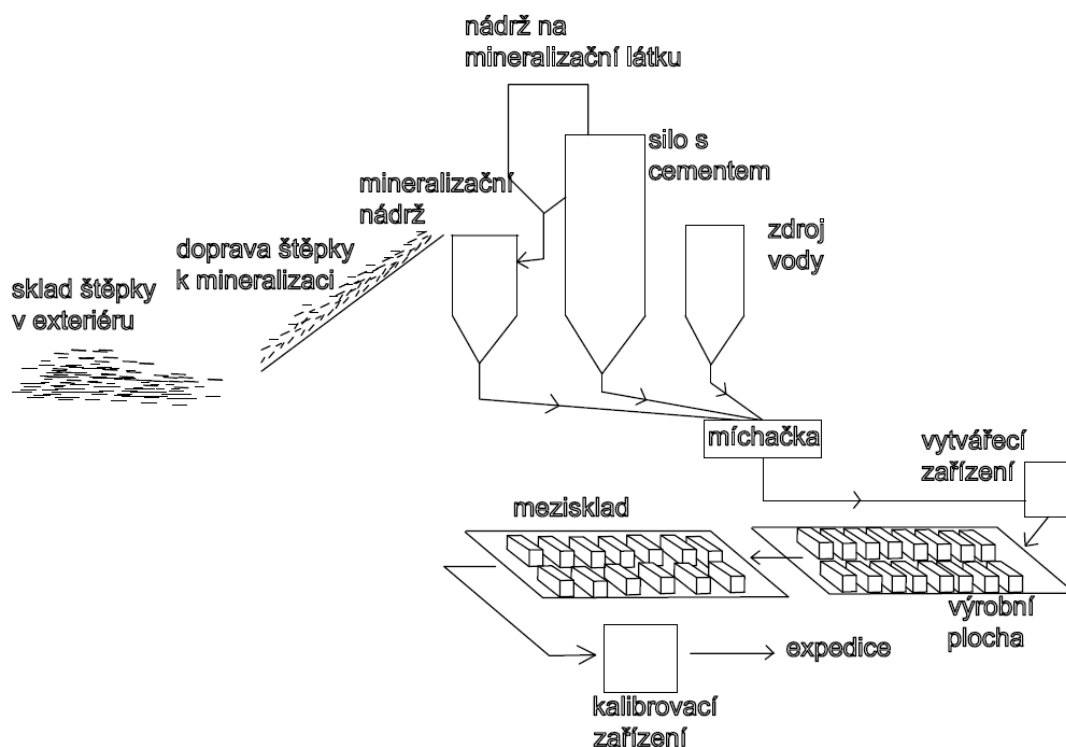
7.2.4 Štěpkocement

Štěpkocementové tvarovky byly vyvinuty v 50. letech minulého století. Původní užití ve formě tvárnic pro ztracené bednění bylo postupem času rozšířeno, a dnes je známa řada aplikací štěpkocementu.^{46,47}

Štěpkocement se skládá ze 4 základních surovin. Variabilita složení tkví zejména v druhu použitých přísad, které jsou považovány za know-how jednotlivých výrobců. Základem štěpkocementu je dřevní štěpka, která je výhradně odkorněná a nazývá se bílou, neboli papírenskou štěpkou. Její velikost se pohybuje v rozmezí 20–100 mm a její objemové zastoupení ve finálním výrobku tvoří až 90 %.⁶⁵ Štěpka je vázána portlandským, nebo portlandským směsným cementem. Dalšími dvěma surovinami jsou voda a přísady. Pod pojmem přísady se skrývají zejména mineralizační látky, užívané k ošetření štěpky, a v některých případech se používají také plastifikátory.⁴⁶

Výroba štěpkocementu je v podstatě stejná pro všechny druhy výrobků, jediným rozdílem je vytváření finálního produktu. První a nejdůležitější operací ve výrobním procesu je ošetření neboli mineralizace dřevěných štěpek. Po té následuje smíchání všech surovin a dávkování do vytvářecího zařízení. Vytvořené výrobky se ponechávají po určitou dobu zrát, aby dosáhly manipulační pevnosti. Po té jsou přemístěny do meziskladu, kde

dozrávají, dokud nedosáhnou pevnosti potřebné pro kalibraci. Posledním krokem je finální úprava, která zahrnuje rozměrovou kalibraci doplnění výrobku o tepelnou izolaci. Schéma výrobního procesu je na obrázku 5.⁷⁶



Obrázek 5. Schématické znázornění výrobního procesu štěpkocementových tvárníc⁷⁶

Štěpkocement má mnoho vynikajících vlastností, pro které je po celém světě stále více využíván. Jedná se o materiál s nízkou objemovou hmotností, která je však vykoupena nízkou pevností. Jelikož nemá štěpkocement ze své podstaty plnit nosnou funkci, nelze tento fakt brát jako nevýhodu.^{47,77} Avšak nízké pevnosti v období vytváření výrobku (ranné pevnosti) stěžují výrobní proces, jelikož je nutné ponechat výrobky na vytvářecí ploše do doby nabytí manipulačních pevností.⁷⁶ Nespornou výhodou štěpkocementu je jeho požární odolnost a reakce na oheň,²⁵ podle níž se řadí mezi těžce hořlavé⁷⁸ až nesnadno hořlavé materiály.⁶⁵ Jedním ze základních důvodů, proč je tento materiál velice oblíben, jsou jeho tepelně izolační vlastnosti. Součinitel tepelné vodivosti štěpkocementu se pohybuje mírně nad hraniční hodnotou určující tepelné izolanty, z čehož vyplývá, že sám o sobě není tepelným izolantem.^{65,77} Avšak nedílnou součástí obvodových stěn, vytvořených ze ztraceného bednění ze štěpkocementu, je tepelná izolace. V konečném důsledku může obvodová stěna, tvořená betonovým jádrem, tepelnou izolací a štěpkocementem, nabývat hodnoty tepelného odporu až $6,54 \text{ m}^2\text{K/W}$ při tloušťce stěny 350 mm. Tato hodnota je

překonána pouze speciálními tepelně izolačními keramickými tvarovkami, nebo pórobetonovými tvárnici, které ovšem vytváří obvodovou nosnou konstrukci ve větší tloušťce.^{79,80} Další vlastností, díky níž se tento materiál těší velké oblibě, je vzduchová neprůzvučnost, která v dnešní době nabývá čím dál více na významu a již není důležitá pouze s ohledem na speciální použití štěpkocementu ve formě protihlukových stěn a obkladů, ale velice se cení i v občanské výstavbě. Parametrem, který hodnotí vzduchovou neprůzvučnost, je index vzduchové neprůzvučnosti R_w , který dle skladby konstrukce může nabývat hodnot 50–64 dB. V případě posuzování protihlukových stěn se hodnotí vzduchová neprůzvučnost a zvuková pohltivost. Dle hodnocení z pohledu vzduchové neprůzvučnosti, jsou protihlukové stěny ze štěpkocementu zařazeny do kategorie B3.^{65,76,81} Ovšem pokud panely hodnotíme z hlediska zvukové pohltivosti, mohou protihlukové stěny nabývat různých hodnot dle konstrukčního řešení absorpční vrstvy. Štěpkocementové protihlukové stěny se tedy dle zvukové pohltivosti řadí to kategorií A2-A4.^{65,78,81} Mezi hlavní přednosti tohoto materiálu patří značná životnost, která je ověřována již po desítky let. Životnost štěpkocementu je zapříčiněna vlastnostmi jako mrazuvzdornost, rozměrová stabilita, nízká nasákavost. Jelikož tento materiál obsahuje i více než 80 % dřeva, jsou velmi sledovanými vlastnostmi odolnost proti hnilobě, dřevokazným houbám a hmyzu. Všem těmto nepříznivým faktorům štěpkocement odolává díky mineralizaci a obalení štěpek cementovou maticí.⁷⁷ V dnešní době je jedním z hlavních (často nepreferovanější) parametrů cena stavebního materiálu. V tomto ohledu má systém výstavby ze štěpkocementových dílců několik nesporných výhod. První výhodou jsou nízké náklady na dopravu dílců a na jejich pořízení. Dále možnost opracování štěpkocementu i ručními nástroji, snadná manipulace a tudíž nízké nároky na mechanizaci. A v neposlední řadě se jedná o „stavebnicový systém“ což znamená nízké náklady na pracovní sílu a úsporu času. V tabulce 9 jsou uvedeny hodnoty vybraných vlastností štěpkocementu.^{65,77,78}

Tabulka 9. Vybrané vlastnosti štěpkocementu^{47,65,77,78}

Vlastnost -mechanická, fyzikální, chemická	Hodnota
Hořlavost	A2-B-s1, d0 - dle ČSN EN 13501
Objemová hmotnost	750 kg/m ³
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,11–0,13 W/mK
Pevnost v tlaku	2,0 MPa
Pevnost v tahu za ohybu	1,5 MPa

Ze štěpkocementu se nejprve vyráběly pouze tvárnice pro tzv. ztracené bednění, do něhož je ukládáno betonové jádro. Toto betonové jádro je doplněno o betonářskou výztuž

a díky tomu se z tohoto stavebního systému mohou vytvářet i několikapatrové budovy. Tvárnice ztraceného bednění se navíc doplňují tepelnou izolací nejčastěji ve formě pěnového polystyrenu a obvodová stěna zhotovená z tohoto systému plně vyhovuje tepelně technickým požadavkům.⁷⁸ Kromě zhotovování obvodových a vnitřních stěn z tvárníc sloužících jako ztracené bednění, je možno vytvářet stěny z desek, které plní totožnou funkci. Tyto desky se vzájemně spojují přibíjením a distanci pro betonové jádro a tepelnou izolaci zajišťují ocelové spony. Dnes je již možné ze štěpkocementu zhotovit celou budovu, jelikož jsou produkovány prefabrikované stropní prvky, stropní bednicí prvky, bednění sloupů a věnců, překlady.⁶⁵ Další oblastí, kde se s velkým úspěchem štěpkocement uplatňuje je akustika. Je možné vytvářet protihlukové obklady a panely. Protihlukové obklady se užívají v místech, kde není možnost použít klasické protihlukové panely, například v tunelech. Protihlukové panely se vyrábějí dvojího druhu. První způsob je založen na dřevěném rámu, který je z obou stran opláštěn protihlukovými deskami. Druhou možností je vytvoření panelu sestávajícího se z železobetonového panelu a štěpkocementové protihlukové desky.^{76,78}

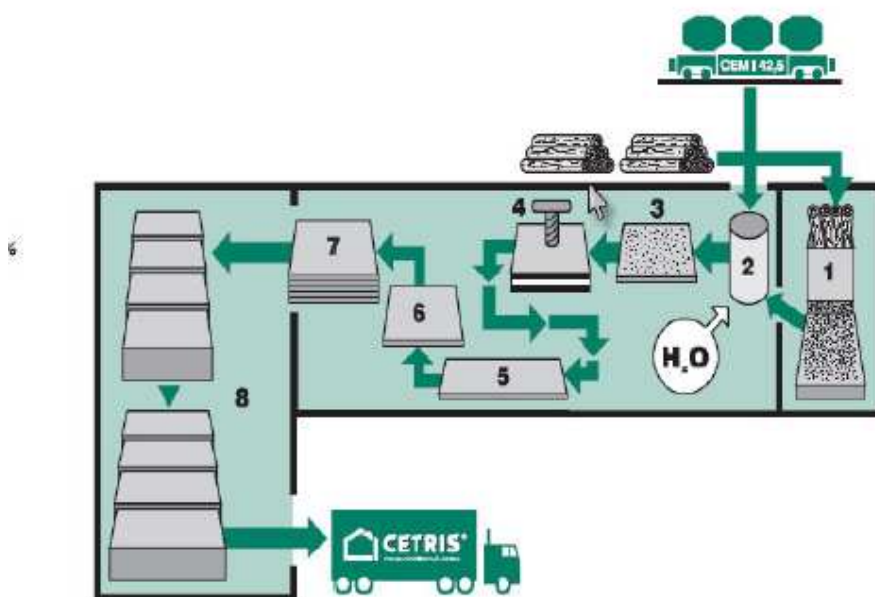
Důkazem, že štěpkocement je velice oblíbeným materiálem, jehož vývoj jde neustále kupředu, je například studie, kterou provedli Ashori a kolektiv.⁸³ Zabývali se možností využití štěpky z vyřazených železničních pražců jako plniva do štěpkocementu. Hlavním důvodem jejich výzkumu, byla otázka ekologie, jelikož železniční pražce obsahují různé nesnadno biologicky rozložitelné látky. Při vytvoření štěpkocementu ze železničních pražců, dojde v podstatě k solidifikaci toxického odpadu. Použili pražce ošetřené pesticidem PEA, jenž obsahoval kreosot. Klasické složení štěpkocementové směsi doplnili o chlorid vápenatý, který byl užít jako urychlovač tvrdnutí cementu. Výsledky ukázaly, že je štěpkocement z vyřazených železničních pražců zcela plnohodnotným materiálem ve vztahu ke klasickému štěpkocementu. V této studii bylo docíleno vcelku vysoké pevnosti v tahu za ohybu (až 10 MPa) a soudržnosti. Nižší modul pružnosti potvrzuje, že štěpkocement je materiál, který velice dobře dokáže absorbovat energii.⁸³

7.2.5 Cementotřísková deska

Cementotřískové desky patří mezi nejvíce užívané dřevokompozity s anorganickou maticí i přesto, že jejich výroba v masovém měřítku započala oproti jiným produktům z této skupiny materiálů o mnoho let později. Hlavními důvody proč jsou tyto desky tak oblíbené, je univerzálnost jejich použití, dostupnost surovin pro jejich výrobu a díky tomu také přijatelné pořizovací náklady a v neposlední řadě jejich dobré vlastnosti.^{84,85}

Cementotřískové desky se skládají ze 4 základních komponent. Složení výrobních směsí, respektive dávky jednotlivých komponent jsou rozdílné dle užívané výrobní technologie a dle jednotlivých výrobců. Základní surovinou jsou dřevěné třísky, které jsou pojeny portlandským cementem, nejčastěji třídy 42,5. Součástí výrobní směsi je samozřejmě voda a mineralizační látky. Nejčastěji jsou jako mineralizační látky užívány křemičitan sodný a síran hlinitý.^{45,86}

Cementotřískové desky je možné vyrábět dvěma základními způsoby. Jedná se o systémy Bison a Eltomation. Tyto dva systémy se neliší pouze způsobem výroby, ale také strukturou vzniklé cementotřískové desky. Systém Bison vytváří desky ze tří nebo čtyř vrstev, z nichž střední vrstvy jsou s hrubými a vnější s jemnými třískami. Výrobní proces začíná roztřískováním odkorněné dřevní hmoty. Třísky se následně dopraví do sil, odkud přes dávkovací zařízení putují do míchacího zařízení, kde se smísí s portlandským cementem vodou a mineralizačními látkami. Toto míšení probíhá ve dvou míchacích zařízeních – s jemnými dřevěnými částicemi a s hrubými dřevěnými částicemi. Následuje rozprostírání vzniklé hmoty (cementotřískového rouna) na plechy čtyřmi nebo třemi za sebou umístěným stroji, z nichž první a poslední ukládají krycí vrstvy a prostřední stroje ukládají středovou vrstvu. Po té jsou podložky s cementotřískovým rounem stohovány na sebe, slisovány a zavezeny do vytvrzovací komory, kde po 6 – 8 h získávají manipulační pevnost. Po dosažení manipulační pevnosti jsou desky odformovány a uloženy do klimatizované místnosti kde dalších 7 dní dozrávají. Po vyzrání se desky suší a formátují. Tento způsob výroby je uveden na obrázku 6.⁸⁴ U cementotřískových desek vyrobených pomocí systému Eltomation se jednotlivé vrstvy s hrubými a jemnými třískami prolínají, respektive jedna přechází postupně ve druhou. Proces výroby systémem Eltomation je v podstatě podobný systému Bison. Vše začíná roztřískováním dřevní hmoty. Všechny suroviny se následně přes dávkovací zařízení dopraví do míchacího zařízení. Zde dochází k míchání naprosto všech složek, tedy cementu, vody, mineralizačních látek, hrubých i jemných dřevních částic. Následuje rozprostírání rouna dvěma stroji na plechy. První rozprostírací stroj nejprve ukládá vrstvu s jemnými částicemi a postupně přechází v ukládání hrubší vrstvy. Druhý rozprostírací stroj ukládá opět vrstvu s jemnými částicemi. Následně jsou plechy s cementotřískovým rounem stohovány a lisovány, vytvrzovány v klimatizované komoře. Dalšími kroky jsou sejmutí desek z plechů a hrubé naformátování, uložení do dozrávací komory, sušení a formátování.⁸⁴



Obrázek 6. Schéma výroby cementotřískových desek, 1. roztrhávání dřevní hmoty, 2. míchání směsi, 3. vrstvení směsi, 4. stohování a lisování směsi, 5. zrání a sušení, 6. formátování, 7. skladování, 8. expedice ⁸⁶

Výroba cementotřískových desek je vcelku časově i energeticky náročná a proto je snahou celý výrobní proces více zefektivnit. Touto problematikou se zabývalo mnoho výzkumníků.^{87,88} Například Simatupang a kolektiv zjistili, že vstřikováním CO_2 do lisovaného dřevotřískového rouna se dosáhne extrémního zefektivnění výrobního procesu. Čas nutný pro dosažení manipulační pevnosti se zkrátil z běžných 8 hodin na pouhé 4 minuty. Zároveň došlo jen k mírnému zhoršení mechanických vlastností cementotřískových desek. Celé zrychlení výrobního procesu bylo způsobené karbonatací díky vstřikovanému CO_2 . Tato karbonatace zapříčinila rychlý nárůst ranné pevnosti cementotřískové desky. Kromě vstřikování CO_2 je možné proces urychlit přidavkem uhličitany amonného, sodného či draselného. Tyto uhličitany se během lisování rozloží a vzniklý CO_2 opět způsobí karbonataci. Tento proces je však čtyřikrát pomalejší, než-li přímé vstřikování CO_2 , a navíc dojde k výraznějšímu poklesu mechanických vlastností cementotřískových desek.⁸⁸

Cementotřískové desky se vyrábějí v různých modifikacích, a proto jednoznačně určit jejich vlastnosti zcela nelze. Hlavní předností cementotřískových desek je jejich reakce na oheň, podle níž jsou klasifikovány jako nesnadno hořlavé. Dále vykazují vysokou pevnost v tahu za ohybu i v tlaku. Velice ceněnou vlastností cementotřískových desek je příznivá lineární roztlačnost při změně vlhkosti. Tento materiál je mrazuvzdorný, zvukově izolační

díky dobré odrazivosti zvuku. Tepelně technické vlastnosti řadí cementotřískové desky mezi tepelné vodiče, jelikož součinitel tepelné vodivosti se pohybuje nad hodnotou 0,2 W/mK. Samozřejmostí je vysoká odolnost proti dřevokazným houbám, hmyzu a plísním. Tento materiál lze také lehce opracovávat ručními nástroji, pro jeho instalaci není nutná těžká mechanizace a pořizovací náklady na tento materiál jsou velice přijatelné. Hodnoty některých vlastností jsou uvedeny v následující tabulce 10.^{84,85,89}

Tabulka 10. *Vybrané vlastnosti cementotřískových desek*^{86,89}

Vlastnost -mechanická, fyzikální, chemická	Hodnota
Hořlavost	A2 – s1 d0 - dle ČSN EN 13501-1+A1
Objemová hmotnost	1350 kg/m ³
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,200-0,287 W/mK
Index vzduchové neprůzvučnosti R_w	30–35 dB
Pevnost v tlaku	33 MPa
Pevnost v tahu za ohybu	11,5 MPa

Použití cementotřískových desek je velice variabilní a díky speciálním úpravám mohou být použity i pro náročnější aplikace. Základní oblastí, kde se používají, jsou stěnové systémy. Konkrétně se jedná o vnitřní stěny a obvodové stěny s izolací z polystyrenu, plnící funkci ztraceného bednění. Velice rozsáhlá oblast, kde cementotřískové desky našly široké uplatnění, jsou fasádní systémy. Díky vcelku vysokému součiniteli tepelné vodivosti se velmi často používají v podlahových konstrukcích obsahujících vytápění. Dalšími vlastnostmi, které určují jejich uplatnění je odolnost proti povětrnostním vlivům, zejména proti vlhkosti a požární odolnost. Díky těmto vlastnostem se užívají jako součást protipožárních a střešních konstrukcí. V podstatě se dá říci, že možnostem aplikace dřevotřískových desek se meze nekladou a jsou využívány například jako výplně zábradlí či ztracené bednění na mostních stavbách.⁸⁶

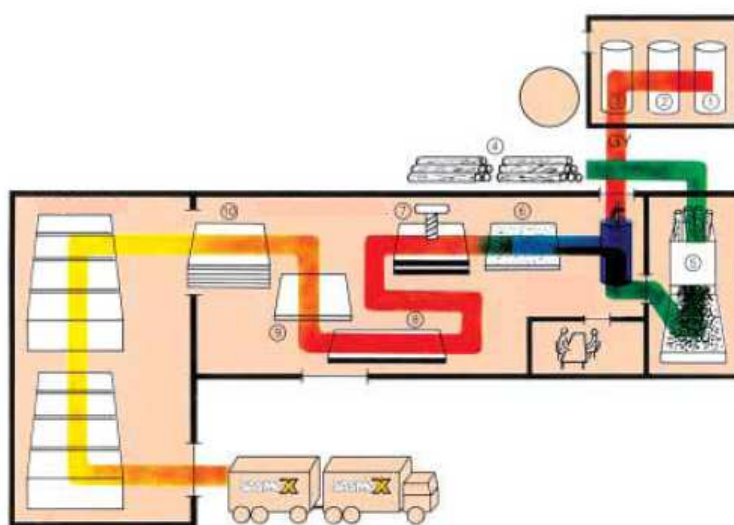
7.2.6 Sádrotřískové desky

Historie sádrotřískových desek sahá do první poloviny 80. let 20. století. Byly vyvinuty v Německu, de facto jako modifikace dřevotřískových desek pojených pryskyřicí (dřevotřísky). Tento materiál má stejnou výhodu jako sádrovláknité desky v porovnání se sádrokartonovými deskami a to, že při výrobním procesu se spotřebuje velice málo vody nutné pro hydrataci sádry, a proto je tato výrobní technologie označována jako „suchá“.

Tento výrobek se bohužel doposud na trhu stavební výroby příliš neuplatnil i přesto, že ve srovnání se svým předchůdcem – dřevotřískovou deskou, je tento výrobek i jeho produkce ekologická. Nejpravděpodobnějšími důvody, proč sádrotřískové desky nejsou doposud používány v masovějším měřítku je nejspíše špatná snášenlivost vlhkého prostředí v porovnání s možnými alternativami.^{47,90}

Jako u všech dřevokompozitů s anorganickou maticí i v případě sádrotřískové desky je možná jistá variabilita ve vstupních surovinách. Základními surovinami jsou β sádra a dřevní třísky. Používá se β sádra různého původu, tedy vyrobená z přírodního sádrovce, z energosádrovce nebo z chemosádrovce. Nezbytnou surovinou při výrobě sádrotřískových desek je retardér sádry, konkrétně kyselina citrónová.^{47,90,90}

Výroba sádrotřískových desek probíhá vcelku podobně jako výroba cementotřískových desek.⁴⁷ Nejprve dochází k roztřískování kulatiny, poté se třísky míchají s vodou a sádrou a retardérem sádry. Po uložení sádrotřískového rouna na plechy jsou stohovány a lisovány. Desky jsou sušeny pod permanentním tlakem do okamžiku nabití manipulační pevnosti. Následuje odformování, kalibrace, a balení desek. Celý proces výroby je uveden na obrázku 7.⁹²



Obrázek 7. Schéma výroby sádrotřískových desek. 1-3. sila na sádro, 4. kulatina, 5. roztřískování kulatiny, následuje míchání směsi, 6. rozprostření rouna, 7. stohování a lisování, 8. sušení, 9. kalibrace desek, 10. balení desek⁹²

Hlavní předností tohoto materiálu je požární odolnost, díky níž je jím možné nahradit klasické dřevotřískové materiály. Tato požární odolnost je nejvyšší ze všech dřevěných

kompozitů s anorganickou maticí a důvodem je nejspíš přítomnost velkého množství vody v sádře, která při požáru uniká, mění se v páru a vytváří clonu mezi požárem a deskou.⁹³ Objemová hmotnost je srovnatelná s cementotřískovou deskou by je o něco nižší. Dnes již sádrotřískové desky dosahují dostatečných pevností. Bohužel doposud nebyly odstraněny největší nevýhody tohoto materiálu, a sice malá objemová stálost a vysoká nasákavost. Naopak je nutné vyzdvihnout fakt, že sádrotřísková deska je oproti sádrokartonové desce nedrobivá. Sádrotřískové desky je možno opracovávat ručními nástroji jako všechny ostatní dřevokompozity s anorganickou maticí. V neposlední řadě je dobré brát na zřetel, že se jedná o velice ekologický materiál.^{90,91,92} Hodnoty základních vlastností sádrotřískových desek jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11. *Vybrané vlastnosti sádrotřískových desek*⁹²

Vlastnost -mechanická, fyzikální, chemická	Hodnota
Hořlavost	A2 – s1 d0 - dle ČSN EN 13501-1+A1
Objemová hmotnost	1250 kg/m ³
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,240 W/mK
Index vzduchové neprůzvučnosti R_w	35-36 dB
Pevnost v tlaku	9,5 MPa
Pevnost v tahu za ohybu	9 MPa

Jelikož se jedná o poměrně nový druh stavebního materiálu, jsou neustále vyvíjeny snahy o jeho vylepšení. Možností jak vylepšit mechanické vlastnosti sádrotřískových desek se zabývali Deng a Furuno,⁹⁰ kteří zkoumali vliv polypropylenových vláken na mechanické vlastnosti sádrotřískových desek. Zjistili, že s rostoucím obsahem PP vláken, roste také vnitřní pevnost kompozitu (soudržnost vláken a matrice), pevnost v tahu za ohybu. Nejvyšších hodnot mechanických vlastností dosáhli při dávce 9 % 3 mm dlouhých vláken, jelikož vlákna byla rovnoměrně rozmístěna v matrici. Naopak podle předpokladu nasákavost a bobtnavost sádrotřískových desek klesala spolu se stoupajícím obsahem PP vláken a to z důvodu, že jsou hydrofilní, ale především se při jejich přidavku ekvivalentně snížil obsah dřevěných třísek.⁹⁰ Deng a Furuno⁹⁴ zkoumali také možnost přidání jutového vlákna a dosáhli podobných výsledků jako s PP vlákny.⁹⁴ Jelikož přidavek vláken různého druhu měl za následek zlepšení pouze mechanických vlastností a odolnost sádrotřískových desek proti vodě příliš zlepšena nebyla, rozhodli se Deng a kolektiv,⁹⁵ že do sádrotřískové směsi přidají látku odpuzující vodu. Touto látkou byl organosilikon. Výsledky ukázaly, že

při vhodné dávce je možné zvýšit vnitřní pevnost, snížit nasákavost a bobtnavost sádrotřískové desky. Přídavek této látky měl pozitivní vliv také na pevnost v tahu za ohybu a modul pružnosti. Ale v případě přidání vyššího množství organosilikonu (optimální dávka 3 %), došlo ke zhoršování všech vlastností.⁹⁵ Další možností vylepšení vlastností sádrotřískových desek je přídavek portlandského cementu. Touto možností se zabývali Espinoza-Herrera a Cloutier.⁹⁶ Konkrétně zjišťovali, jaký vliv bude mít přídavek portlandského cementu do sádrotřískové desky na její mechanické a fyzikální vlastnosti. Jejich závěrem je, že přidáním cementu do sádrotřískových desek dojde k výraznému zlepšení vlastností. Nasákavost vzorků se snížila o plných 26 %, což je 5 krát více než v případě vzorků, do kterých byla přidána hydrofobní látka, či jutová nebo PP vlákna.^{90,94,95,97} Bobtnavost byla snížena ještě více a to 61,3 % a je porovnatelná s cementotřískovými deskami.⁹⁸ Rozměrová stálost vzorků se zlepšila o 46 % po přidání cementu, což je hlavně způsobeno velmi nízkou rozpustností zhydratovaného cementu ve vodě, čímž zamezí přístupu vody k dřevěným třískám. Samozřejmě došlo také k výraznému zlepšení mechanických vlastností zejména pevnosti v tahu za ohybu i soudržnost.⁹⁷

Použití sádrotřísky vychází zejména z jejích vlastností. Užívá se hlavně na středně těžké příčky. Tento materiál je velmi využíván jako zvuková izolace. Díky možnosti dekorativní úpravy povrchu například papírem, nebo nátěrem se ze sádrotřískových desek zhotovují obklady zdí. Oblast, ve které tyto desky hrají prim je ovšem protipožární ochrana, což znamená, že se z nich vytváří obklady na konstrukcích všeho druhu.^{90,91,92}

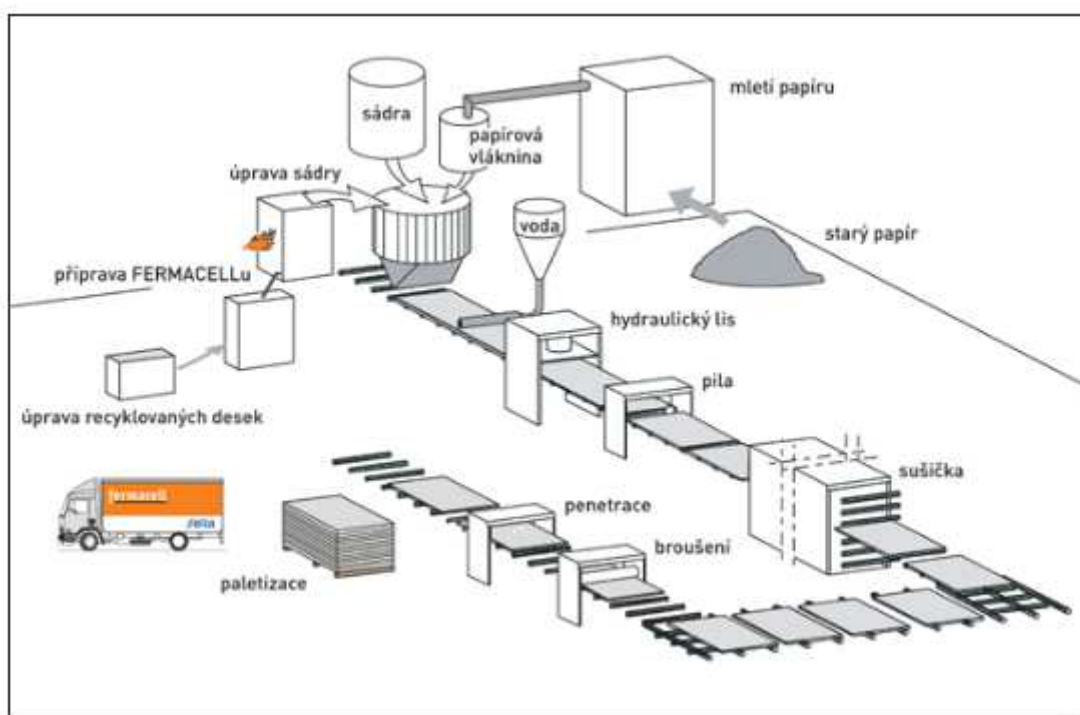
7.2.7 Sádrovláknité kompozity

Produkce sádrovláknitých výrobků je nejvíce rozvinuta v Evropě a vznikla jako alternativa k sádrokartonové desce. Hlavním rozdílem a výhodou oproti sádrokartonové desce je nižší spotřeba vody (4 až 6 násobně) nutná k hydrataci sádry, která je zajištěna rozvlákněným papírem v sádrové matici. Tento efekt je způsoben nasákavostí rozvlákněného papíru, který pojme přebytečnou vodu. V současnosti se vyrábí dva základní druhy sádrovláknitých produktů, které se liší zejména přítomností/absencí skleněných vláken. Dále jsou produkovány různé modifikace sádrovláknitých výrobků, ve kterých jsou užity speciální přísady, nebo různé úpravy s ohledem na předpokládané užití.⁴⁷

Sádrovláknité produkty prošli během několika posledních let vývojem a kromě základních surovin, jimiž jsou sádra, voda a vlákna odpadního či recyklovaného papíru,

mohou obsahovat i příměsi. Sádra je vždy užívána ve formě β sádry. Papírová vlákna mohou být dvojího druhu, buď z recyklovaného, anebo přímo z odpadního papíru. Skleněná vlákna nemusí být nijak upravována, jelikož sádra vytváří neutrální prostředí. Jako příměs může být použita například ovčí vlna ve spojení s keratinem.^{47,99}

Jak je vidět na obrázku 8, celý výrobní proces se skládá ze smíchání suchých složek, ke kterým se následně přidá voda a směs se lisuje ve formě desek. Při lisování dochází k tomu, že sádrová suspenze se dostane dovnitř papírových vláken a zároveň je obalí. Po lisování následuje 30 minutové sušení, impregnace a formátování.⁹⁹



Obrázek 8. Schéma výroby klasických sádrovláknitých desek⁹⁹

Sádrovláknité výrobky se mohou pyšnit několika parametry. Jedním z těchto parametrů je vcelku nízká objemová hmotnost, s níž souvisí samozřejmě snadná manipulace s výrobky. Dle klasifikace reakce na oheň lze zařadit sádrovláknité výrobky mezi nesnadno hořlavé. Tento materiál vykazuje dostatečnou pevnost, především v tahu za ohybu. Další předností sádrovláknitých desek je rozměrová stálost, která souvisí s velmi nízkou navlhavostí. Sádrovláknité desky vykazují také vysokou vzduchovou a kročejovou neprůzvučnost. V neposlední řadě jsou sádrovláknité desky oblíbeny pro svou cenovou dostupnost, která je zapříčiněna tím, že většina surovin je recyklovaný odpad. Vybrané vlastnosti sádrovláknitých desek jsou uvedeny v tabulce 12.⁹⁹

Tabulka 12. Vybrané vlastnosti sádrovláknitých desek ⁹⁹

Vlastnost -mechanická, fyzikální, chemická	Hodnota
Hořlavost	A2 – s1 d0 - dle ČSN EN 13501-1+A1
Objemová hmotnost	1150 kg/m ³
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,320 W/mK
Index vzduchové neprůzvučnosti R_w (dle složení konstrukce)	41-64 dB
Pevnost v příčném tahu	0,3 MPa
Pevnost v tahu za ohybu	5,8 MPa

Sádrovláknité výrobky již našli celou řadu uplatnění a díky jejich vlastnostem lze předpokládat, že škála jejich užití se bude dále zvyšovat. Základní použití je ve formě desek na přičky, stěny, opláštění objektů, požární stěny, podhledy, podlahy, nebo speciální desky řady Greenline je možno užít jako pohlcovače škodlivých látek v ovzduší. Další speciální deskou je Fermacell Vapour, která je zároveň parotěsnou zábranou díky speciálnímu kašírování na rubu desky.^{47,99}

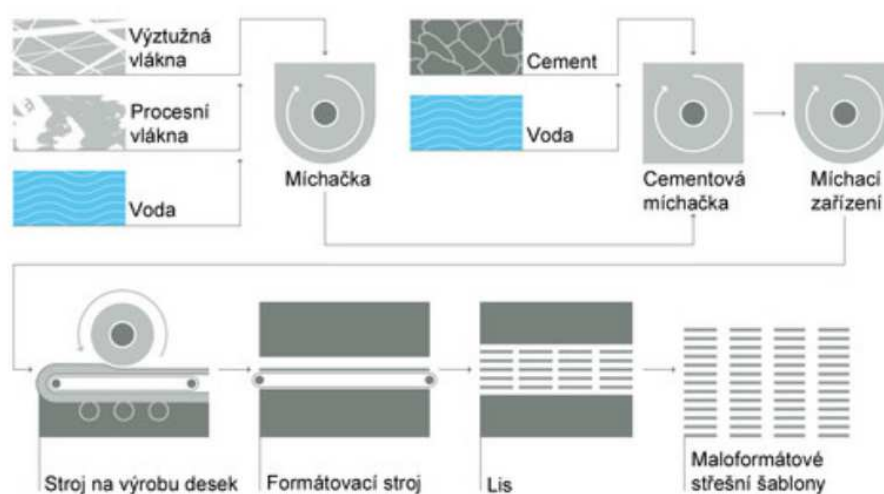
7.2.8 Vláknocementové kompozity

Výroba vláknocementových produktů je v podstatě pouze modifikací Hatschekovi metody výroby azbestocementu, která vznikla již v roce 1901. Jak již bylo zmíněno, od 60. let minulého století byla snaha nahradit azbestová vlákna jiným, zdravotně nezávadným materiálem. Užita byla vlákna ocelová, skleněná, ze syntetických polymerů, ale nejvíce ekonomicky a technicky vhodná byla shledána vlákna celulózová. V dnešní době se již užívá kombinace vláken a to nejčastěji celulózových a vláken ze syntetických polymerů.⁴⁷

Složení vláknocementových kompozitů je dosti variabilní, zejména co se týče užitých výztužných vláken a přísad. Nejčastěji je užíván portlandský, nebo portlandský směsný cement. Vlákna v tomto kompozitu se dělí na takzvaná procesní a výztužná. Pod pojmem procesní vlákna se skrývá buničina a výztužná vlákna jsou na bázi PVA, PP, anebo PAN. Jako přísady se do výrobní směsi aplikují pecní odprašky, mikrosilika či mletý vápenec.^{100,101}

Výrobní procesy vlákno cementu mohou být odlišné v závislosti na použitých surovinách. Novým trendem zejména v Severní Americe je zahrnutí autoklávování do procesu výroby s ohledem na výrazné zkrácení celého vytvářecího procesu.⁴⁷ Na obrázku 9 je znázorněn výrobní proces maloformátových střešních šablon na tzv. Hatschekově stroji.

Zjednodušeně lze výrobu vláknocementových prvků popsat následujícím způsobem. Všechny suroviny se zpracují v míchacím zařízení na řídkou kaši. Tato cementem vázaná směs je následně filtrována skrz nekonečné rouno a stlačována pomocí tvarovacích válců tak dlouho, dokud není dosaženo potřebné tloušťky. Vytvořený pás se naformátuje a neošetřené výrobky jsou umístěny do lisu. Následně se naskládají na sebe a zafóliují. Tímto způsobem přirozeně tvrdnou po dobu 3 týdnů (přirozená doba zrání cementu). Po vyzrání jsou výrobky nabarveny.¹⁰⁰



Obrázek 9. Schéma výroby vláknocementu¹⁰⁰

Vláknocementové výrobky jsou hojně užívanými stavebními prvky, jelikož mají řadu příznivých vlastností. Jejich vlastnosti jsou upravovány v závislosti na účelu užití výrobků. V první řadě, jako všechny dřevokompozity s anorganickou maticí, vynikají svou požární odolností respektive reakcí na oheň, podle níž jsou řazeny mezi nehořlavé.⁷⁴ Objemová hmotnost je vcelku vysoká a pohybuje se ve velkém rozmezí. Součinitel tepelné vodivosti dosahuje vysoké hodnoty, a tudíž se jedná o tepelný vodič. Výrobky z vláknocementu jsou mrazuvzdorné po 100 cyklech. Pevnosti v tahu, tahu za ohybu a modul pružnosti značně kolísají v závislosti na vlhkosti materiálu a na směru namáhání. Některé ze zmíněných vlastností jsou v tabulce 13 uvedeny s příslušnou hodnotou.¹⁰¹

Tabulka 13. *Vybrané vlastnosti vláknocementových výrobků*¹⁰¹

Vlastnost -mechanická, fyzikální, chemická	Hodnota
Hořlavost	A1-A2 – s1 d0 - dle ČSN EN 13501-1+A1
Objemová hmotnost	1450-1850 kg/m ³
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,300 W/mK
Nasákavost	15-20 %
Pevnost v tahu	9-16 MPa
Pevnost v tahu za ohybu	10-24 MPa

Vláknocementové výrobky se uplatňují v mnoha aplikacích, ale nejvíce zastoupenou skupinou jsou střešní krytiny a obkladové fasádní desky. Střešní krytiny mohou být vyráběny ve formě maloformátových prvků (česká šablona, anglický obdélník, dánský obdélník, bobrovka, rhombus), nebo jako velkoformátové vlnité desky. Fasádní desky jsou produkovány jako velkoformátové desky a fasádní šablony. Vláknocementové výrobky se také uplatňují v interiérech, anebo jako střešní podvrstvy.^{100,101}

8 Experimentální část diplomové práce

V experimentální části mé práce jsem se zaměřil na možnost vytvoření kompozitu sestávajícího se z dřevní štěpky a alkalicky aktivované popílkové matrice. Tento kompozit byl koncipován jako možná náhrada štěpkocementu.

Nejprve bylo stanoveno vhodné složení popílkové matrice. Výběr byl prováděn ze 30 různých možností. V podstatě se jednalo o 2 druhy vysokoteplotního popílku, kterými byly popílek Dětmárovice a popílek Chvaletice. Z každého druhu popílku bylo vytvořeno vždy 15 past, které se lišily dávkou a silikátovým modulem alkalického aktivátoru. Dávky alkalického aktivátoru byly stanoveny na 20, 30 a 40 % z hmotnosti popílku pro každý daný silikátový modul, přičemž jsem vytvářel pasty se silikátovým modulem 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 a 3,23.

Z popílkových past byly vytvořeny vždy sady třech trámečků $40 \times 40 \times 160$ mm. Na těchto trámečcích byly po 28 dnech stanoveny pevnosti v tahu za ohybu a tlaku. Na základě výsledků pevností tahu za ohybu a tlaku jsem vybral vzorky, které byly podrobeny zkoušení pomocí rtuťové porozimetrie a snímkování pomocí REM.

Dále byly také určeny doby tuhnutí vybraných popílkových past, pomocí Vicatova přístroje. Tyto popílkové pasty jsem vybral na základě pevností a pozorování, které jsem prováděl v průběhu zrání trámečků. V podstatě jsem pozoroval, po jakém čase dochází u past k tuhnutí a kdy je možno trámečky odformovat.

Posledním krokem ve výběru neoptimálnější popílkové matrice byl optimalizační výpočet, ve kterém byla váha zvolených kritérií posuzována metodou párového srovnání a metodou kvantitativního párového srovnání.¹⁰²

Po určení neoptimálnější alkalicky aktivované popílkové matrice bylo vypočteno množství jednotlivých složek štěpko-popílkového kompozitu dle rovnice absolutních objemů, která je užívána při návrhu složení betonové směsi. Tato rovnice byla pouze upravena tím, že ve výpočtu nebyl uvažován objem vzduchu v dané směsi.

Vytvářel jsem kompozity s jedním druhem matrice a pouze jsem měnil dávky dřevěné štěpky. Tyto dávky byly 0, 5, 10, 15 a 20 % z hmotnosti popílku. Od každé dávky byly vytvořeny 4 krychle o hraně 150 mm, z nichž jedna byla určena na zkoušení tepelné vodivosti a 3 na určení objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku.

Po vytvoření kompozitů byla provedena fotodokumentace a následně určena objemová hmotnost a pevnost v tlaku. Vzorky určené pro stanovení součinitele tepelné vodivosti byly vytvořené odřezem 50 mm silného plátu z kostky o hraně 150 mm.

8.1 Popílkové pasty

8.1.1 Složky popílkových past

Popílkové pasty byly vytvářeny z 2 druhů popílku aktivované sodným vodním sklem s různými moduly a pro docílení dobré zpracovatelnosti byla do pasty přidána také voda. Množství přidané vody nebylo korigováno dle vodního součinitele, nýbrž bylo účelem docílit co nejvíce shodné konzistence u všech vytvořených past.

8.1.1.1 Popílků

Oba použité popílků byly třídy F. Prvním z nich byl hnědouhelný popílek z Chvaletic a druhým byl černouhelný popílek z Dětmovic. Chemické složení popílků je v tabulce 14.

Tabulka 14. Chemické složení popílků

Chemický vzorec	Průměrná hodnota [%]	
	Dětmovice	Chvaletice
SiO ₂	49,8	52,2
Al ₂ O ₃	24,7	29,6
CaO	3,9	8,4
MgO	2,7	1,8
Fe ₂ O ₃	7	1,2
SO ₃	0,9	0,3
Na ₂ O	0,7	1,7
K ₂ O	2,8	0,9
Ztráta žháním	3,3	2,1

8.1.1.2 Alkalický aktivátor

Popílků byly aktivovány sodným vodním sklem, neboli křemičitanem sodným s různými silikátovým modulem a to 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,23. Základní modul sodného vodního skla byl 3,23 a ostatní moduly byly získány smícháním vodního skla s NaOH. Vodní sklo se silikátovým modulem 3,23 se skládalo z SiO₂(24,76 %), Na₂O (7,91 %) a H₂O (67,33 %). V tabulce 15 jsou uvedeny užité poměry při míchání vodního skla a NaOH.

Tabulka 15. Složení vodního skla při daném modulu na 100 g

M_s	vodní sklo [g]	NaOH [g]	Σ (VS + NaOH) [g]
1,0	81,46	18,54	100,00
1,5	89,47	10,53	100,00
2,0	94,09	5,91	100,00
2,5	97,11	2,89	100,00
3,2	100,00	0,00	100,00

8.1.2 Složení a vytváření popílkových past

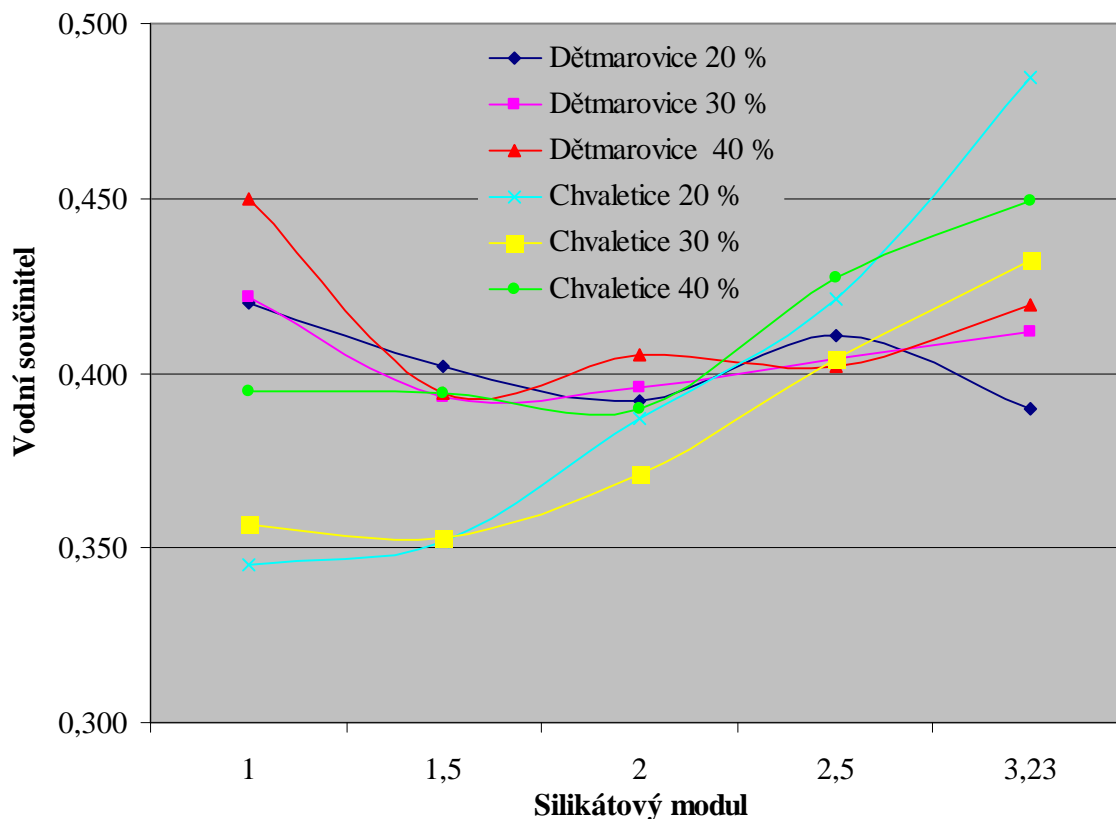
Všechny složky byly dávkovány hmotnostně. Vážení složek probíhalo na vahách Denver Instrument PK-4801 ($d = 0,1$ g). K míchání směsi byla užita planetární míchačka typ MCK 3A s rychlostí 60 otáček za minutu a proces míchání trval vždy 2 minuty. Složení pasty pro vytvoření 3 trámečků $40 \times 40 \times 160$ mm:

- popílek	1000 g
- aktivátor	200/300/400 g
- voda	105 – 285 g (dle konzistence)

V tabulce 16 jsou uvedeny hodnoty vodních součinitelů popílkových past a na obrázku 10 je vidět, že hodnoty vodního součinitele popílkových past se pohybují ve značně širokém rozmezí (0,345 – 0,485) bez zjevné závislosti na výši silikátového modulu v dané pastě, což je samozřejmě zapříčiněno snahou udržet přibližně stejnou konzistenci popílkových past.

Tabulka 16. *Hodnoty vodních součinitelů popílkových past*

Hodnota vodního součinitele w						
M_s	Druh popílku	Dávka aktivátoru [%]	Dávka popílku [g]	Dávka vody [g]	Voda z vodního skla [g]	w [-]
3,23	Dětmарovice	20	1000	255	135	0,390
	Dětmарovice	30	1000	210	202	0,412
	Dětmарovice	40	1000	150	269	0,419
	Chvaletice	20	1000	350	135	0,485
	Chvaletice	30	1000	230	202	0,432
	Chvaletice	40	1000	180	269	0,449
2,50	Dětmарovice	20	1000	275	136	0,411
	Dětmарovice	30	1000	200	204	0,404
	Dětmарovice	40	1000	130	272	0,402
	Chvaletice	20	1000	285	136	0,421
	Chvaletice	30	1000	200	204	0,404
	Chvaletice	40	1000	155	272	0,427
2,00	Dětmарovice	20	1000	255	137	0,392
	Dětmарovice	30	1000	190	206	0,396
	Dětmарovice	40	1000	130	275	0,405
	Chvaletice	20	1000	250	137	0,387
	Chvaletice	30	1000	165	206	0,371
	Chvaletice	40	1000	115	275	0,390
1,50	Dětmарovice	20	1000	260	142	0,402
	Dětmарovice	30	1000	180	213	0,393
	Dětmарovice	40	1000	110	284	0,394
	Chvaletice	20	1000	210	142	0,352
	Chvaletice	30	1000	140	213	0,353
	Chvaletice	40	1000	110	284	0,394
1,00	Dětmарovice	20	1000	275	145	0,420
	Dětmарovice	30	1000	205	217	0,422
	Dětmарovice	40	1000	160	290	0,450
	Chvaletice	20	1000	200	145	0,345
	Chvaletice	30	1000	140	217	0,357
	Chvaletice	40	1000	105	290	0,395



Obrázek 10. Hodnoty vodních součinitelů popílkových past

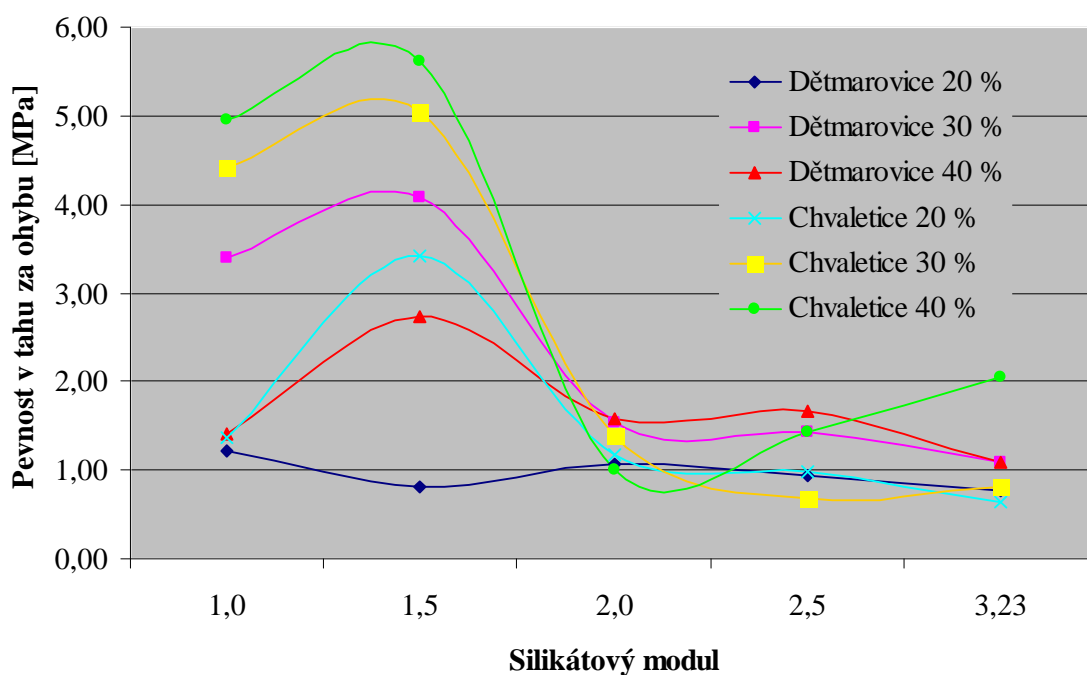
8.1.3 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnosti byly stanoveny dle zkušebního postupu stanoveného normou ČSN EN 196-1.¹⁰³ Zkušebními tělesy byly trámečky $40 \times 40 \times 160$ mm ve stáří 28 dní. Zkoušení bylo prováděno na trhacím stroji typu 2168 ($d = 1$ N) Výsledky pevností v tahu za ohybu jsou uvedeny v tabulce 17 a obrázku 11.

Z výsledků vyplývá, že s narůstajícím silikátovým modulem vodního skla roste i pevnost v tahu za ohybu až do modulu 1,5 a po té klesá. U chvaletického popílku je patrná závislost, že s rostoucí dávkou aktivátoru rostou také pevnosti, avšak u dětmarovického popílku není tato závislost potvrzena, což může být způsobeno jistými imperfekcemi vzorků, jelikož vzorky byly vytvářeny pomocí silikonových forem. Obecně lze říci, že vyšších pevností dosáhly pasty z chvaletického popílku.

Tabulka 17. Pevnosti v tahu za ohybu

M_s	Druh popílku	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]		
		Dávka aktivátoru [%]		
		20	30	40
3,2	Dětmarovice	0,8	1,1	1,1
	Chvaletice	0,6	0,8	2,0
2,5	Dětmarovice	1,0	1,4	1,7
	Chvaletice	1,0	0,7	1,4
2,0	Dětmarovice	1,0	1,5	1,6
	Chvaletice	1,2	1,4	1,0
1,5	Dětmarovice	0,8	4,1	2,7
	Chvaletice	3,4	5,0	5,6
1,0	Dětmarovice	1,2	3,4	1,4
	Chvaletice	1,4	4,4	5,0

**Obrázek 11.** Pevnosti v tahu za ohybu popílkových past po 28 dnech

8.1.4 Pevnost v tlaku

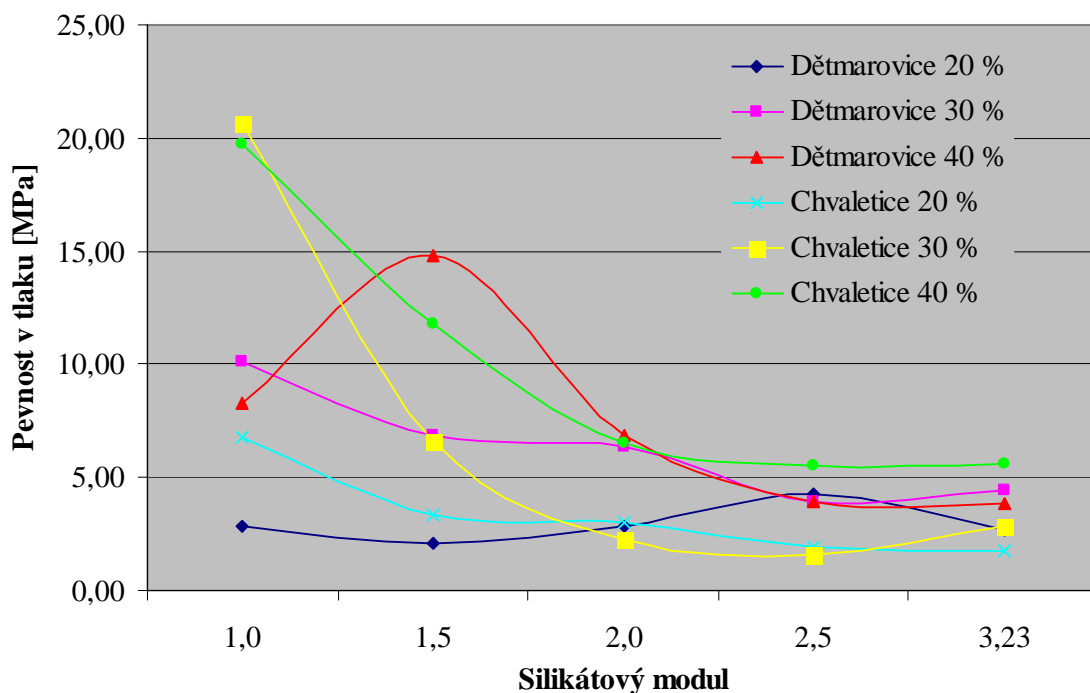
Pevnosti byly stanoveny na zlomcích normových trámečků $40 \times 40 \times 160$ mm ve stáří 28 dní. Zkušební postup stanovení pevnosti byl v souladu s normou ČSN EN 196-1.¹⁰³ Měření probíhalo v hydraulickém lisu typu Toni Technik 2560 – 249 – 1977.

Výsledky pevností v tahu za ohybu jsou uvedeny v tabulce 18 a na obrázku 12.

Z výsledků jsou patrné dva trendy. S klesajícím silikátovým modulem stoupá pevnost v tlaku a zároveň pevnost stoupá se stoupající dávkou aktivátoru. Pokud ovšem výsledky pevností v tlaku srovnáme s hodnotou výše vodního součinitele zjistíme, že vodní součinitel má vliv na pevnosti v tlaku, ale pouze u vzorků se silikátovým modulem 2,0 a nižším. U těchto vzorků docházelo k mírnějšímu nárůstu pevností v tlaku spolu s klesajícím silikátovým modulem, pokud se zvýšila hodnota vodního součinitele. V extrémním případě došlo dokonce k poklesu pevnosti. Získané výsledky potvrzují již zjištěný fakt, že pevnosti v tlaku AAP zrajících při pokojové teplotě klesají se stoupajícím hodnotou vodního součinitele.¹⁰⁴

Tabulka 18. Pevnosti v tlaku

M_s	Druh popílku	Pevnost v tlaku [MPa]		
		Dávka aktivátoru [%]		
		20	30	40
3,2	Dětmarovice	2,7	4,4	3,9
	Chvaletice	1,8	2,8	5,6
2,5	Dětmarovice	4,3	4,0	3,9
	Chvaletice	1,9	1,6	5,5
2,0	Dětmarovice	2,8	6,4	6,9
	Chvaletice	3,0	2,3	6,5
1,5	Dětmarovice	2,1	6,9	14,8
	Chvaletice	3,4	6,6	11,8
1,0	Dětmarovice	2,8	10,1	8,3
	Chvaletice	6,7	20,7	19,7



Obrázek 12. Pevnosti popílkových past v tlaku po 28 dnech

8.1.5 Počátek a konec tuhnutí popílkové pasty

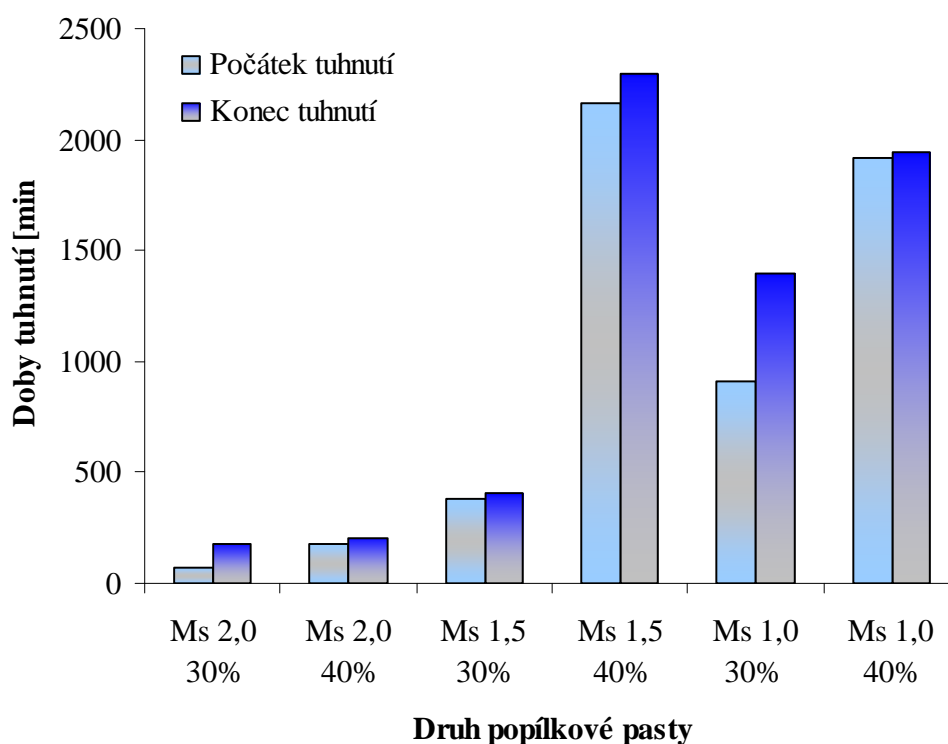
Stanovení počátku a doby tuhnutí jsem prováděl v souladu s normou ČSN EN 196-3.¹⁰⁵ Pro zkoušení počátku a doby tuhnutí jsem vybral 6 různých popílkových past. Byly vybrány pouze popílkové pasty z popílku Dětmarovice, jelikož pasty z popílku Chvaletice nevykazovaly dostatečně rychlé tuhnutí a tvrdnutí.

Nejprve jsem popílkovou pastou naplnil Vicatův prstenec uložený na skleněné destičce a zarovnal povrch s hranou prstence. Vicatův přístroj s jehlou byl nastaven do nulové polohy, jehla posunuta na povrch pasty, uvolněna pohyblivá část přístroje a odečtena hloubka vpichu. Tento postup jsem opakoval nejprve v intervalech 15 minut a posléze 5 minut dokud nebylo dosaženo normou předepsané hodnoty. Po té jsem zapsal čas, který uplynul od namíchání pasty do okamžiku dosažení předepsané hodnoty. Následně jsem prstenec s pastou otočil a pomocí speciální jehly a Vicatovým přístrojem měřil dobu konce tuhnutí. Měření bylo prováděno v intervalech 20 a posléze 15 minut. Výsledné doby počátku a konce tuhnutí popílkových past jsou uvedeny v tabulce 19 a na obrázku 13.

Z výsledků je jasně patrná závislost dob tuhnutí na silikátovém modulu a dávce aktivátoru. S klesajícím modulem narůstají doby počátku a konce tuhnutí a s narůstající dávkou aktivátoru doby tuhnutí klesají.

Tabulka 19. *Počátky a konce tuhnutí popílkových past*

Vzorek	Doby tuhnutí [min]	
	počátek	konec
Ms 2,0 30%	75	180
Ms 2,0 40%	175	205
Ms 1,5 30%	380	410
Ms 1,5 40%	2160	2300
Ms 1,0 30%	910	1400
Ms 1,0 40%	1920	1940

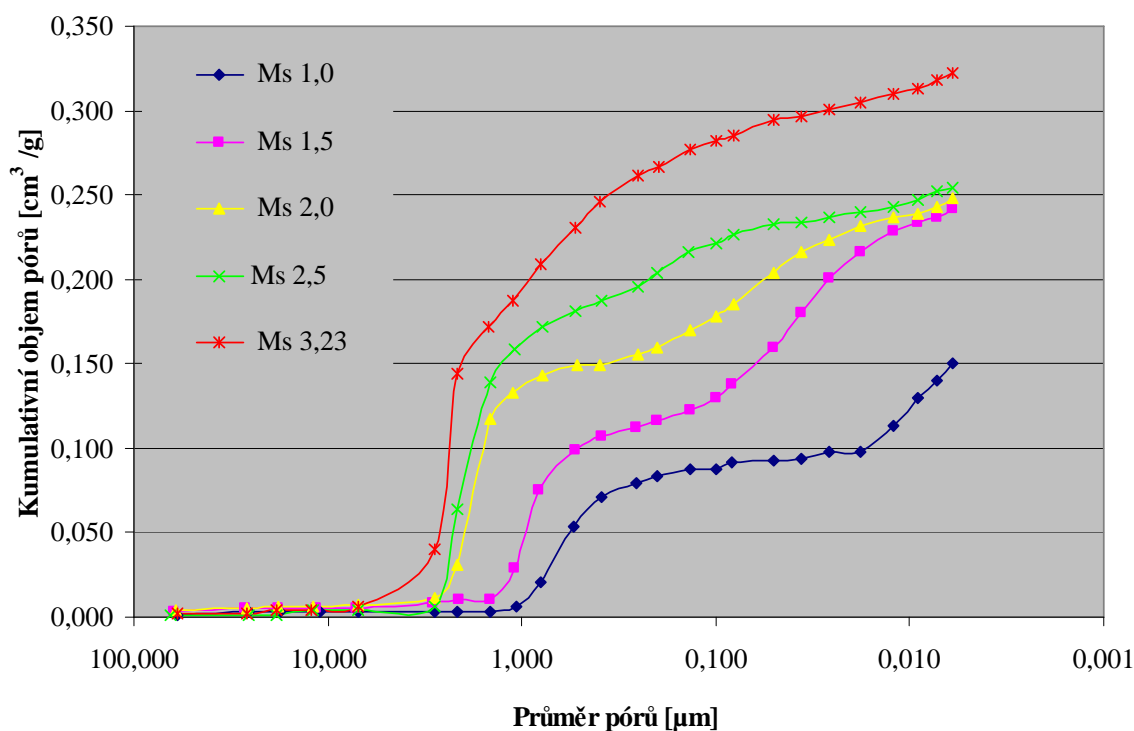
**Obrázek 13.** *Počátky a konce tuhnutí popílkových past*

8.1.6 Porozimetrie popílkových ztvrdlých popílkových past

Porozita ztvrdlých popílkových past byla stanovena metodou vysokotlaké rtuťové porozimetrie. Pro tento účel jsem vytvořil trámečky $20 \times 20 \times 100$ mm. Porozita byla zkoumána na popílkových pastách, v nichž byla dávka aktivátoru 40 %. Bylo vytvořeno vždy 5 past od každého druhu popílku, to znamená vždy od každého silikátového modulu dvě pasty.

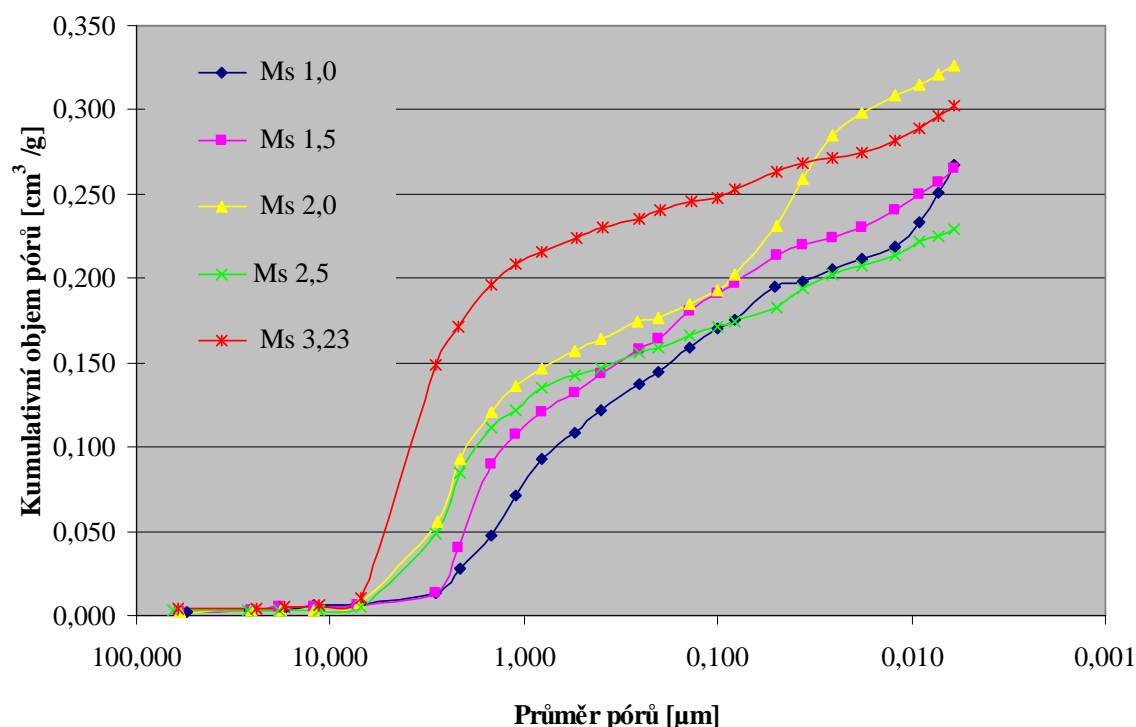
Na obrázcích 14 a 15 jsou uvedeny výsledky kumulativních objemů pórů při daných průměrech pórů a v přílohách 1 a 2 jsou uvedeny tabulky kumulativních objemů pórů. U past z chvaletického popílku lze objevit závislost velikosti silikátového modulu na

kumulativním objemu pórů, kdy s klesajícím silikátovým modulem klesá také kumulativní objem pórů. Kromě toho je patrný také pokles velikosti pórů. Popílek aktivovaný nejvyšším silikátovým modulem Ms 3,23 vykazuje nejvyšší objem pórů v oblasti velkých kapilárních pórů, kdežto popílková pasta aktivovaná nejnižším silikátovým modulem obsahuje pouze střední kapilární póry a gelové póry.



Obrázek 14. Kumulativní objem pórů ztvrdlých popílkových past z popílku Chvaletice

U past z dětmarovického popílku výše zmíněná závislost není zcela patrná, což může být způsobeno nestejným dávkováním záměsové vody. Ve srovnání s pastami z chvaletického popílku je kumulativní objem pórů vyšší, což se také projevilo v nižších hodnotách 28 denních pevností v tlaku.



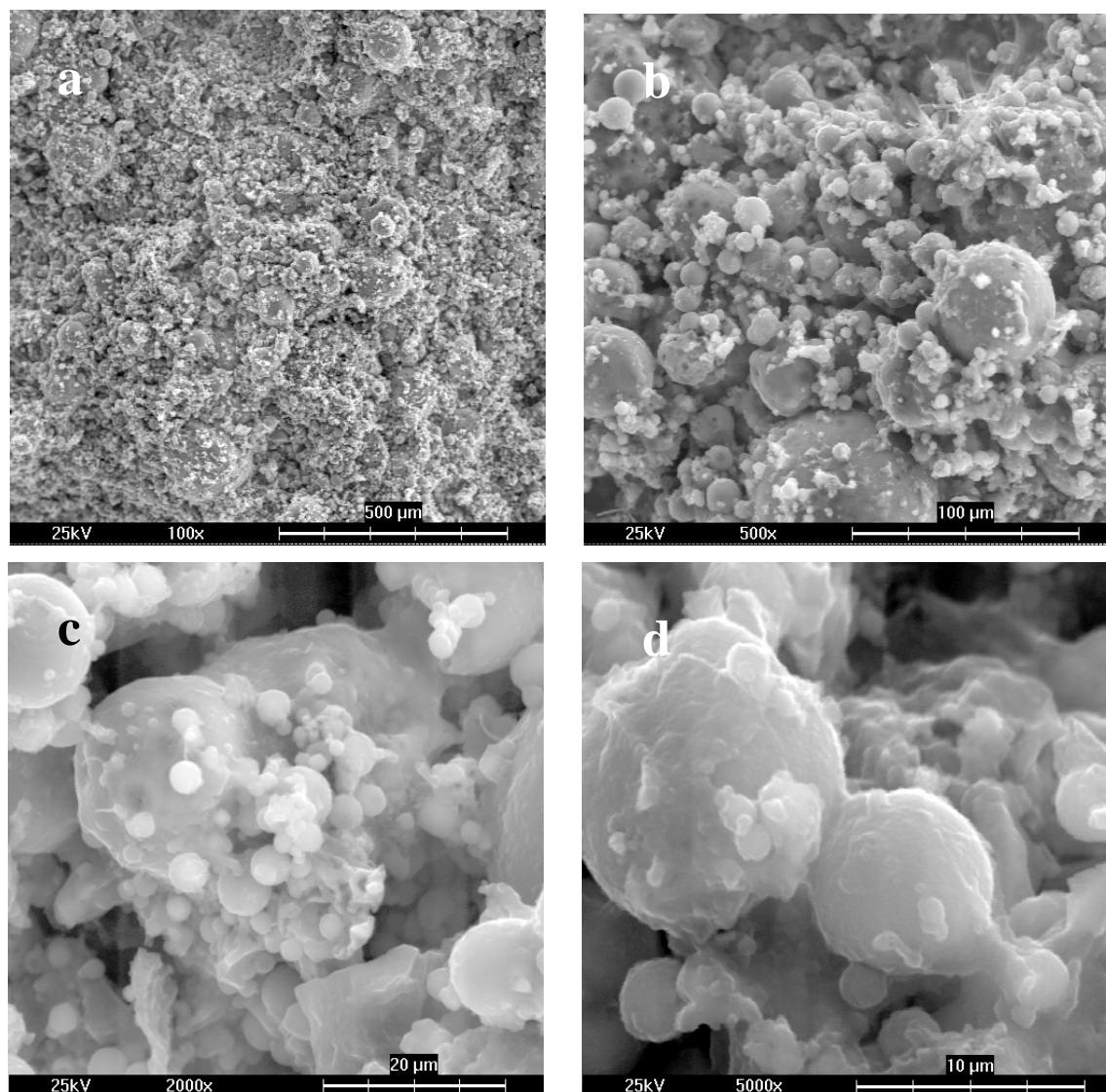
Obrázek 15. Kumulativní objem pórů ztvrdlých popílkových past z popílku Dětmárovice

8.1.7 REM snímky (rastrovací elektronová mikroskopie) ztvrdlých popílkových past

Snímkování ztvrdlých alkalicky aktivovaných popílkových pomocí REM bylo provedeno za účelem zjištění míry zreagování daných popílkových past. Míra zreagování popílkových past byla brána v úvahu při optimalizačním výpočtu jako doplňkové kritérium při rozhodování.

8.1.7.1 REM snímky popílkových past z popílku Dětmárovice

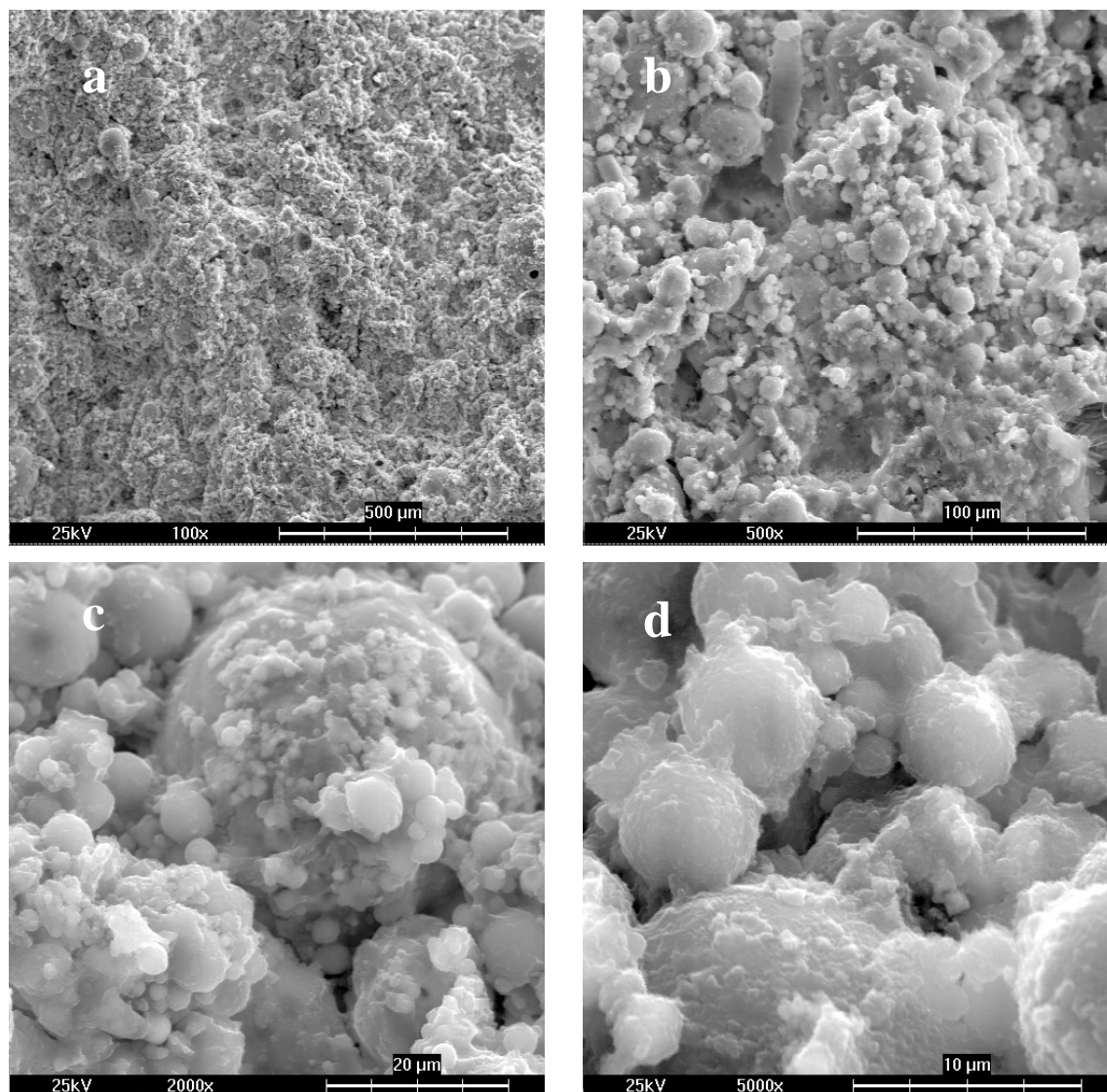
Na snímcích z obrázku 16, ztvrdlé popílkové pasty aktivované vodním sklem s M_s 3,23, je jasně patrné, že došlo k velmi malé míře zreagování popílku, jelikož povrch jednotlivých zrn popílku je pokryt malým množstvím reakčních produktů. Mezi jednotlivými zrny popílku je také velmi malé množství reakčních produktů, s čímž bude souviset velký kumulativní objem pórů do velikosti 1 μm.



Obrázek 16. Snímky ztvrdlé popílkové pasty z popílku Dětmarovice, M_s 3,23;

a) 100× zvětšeno, b) 500× zvětšeno, c) 2000× zvětšeno, d) 5000× zvětšeno

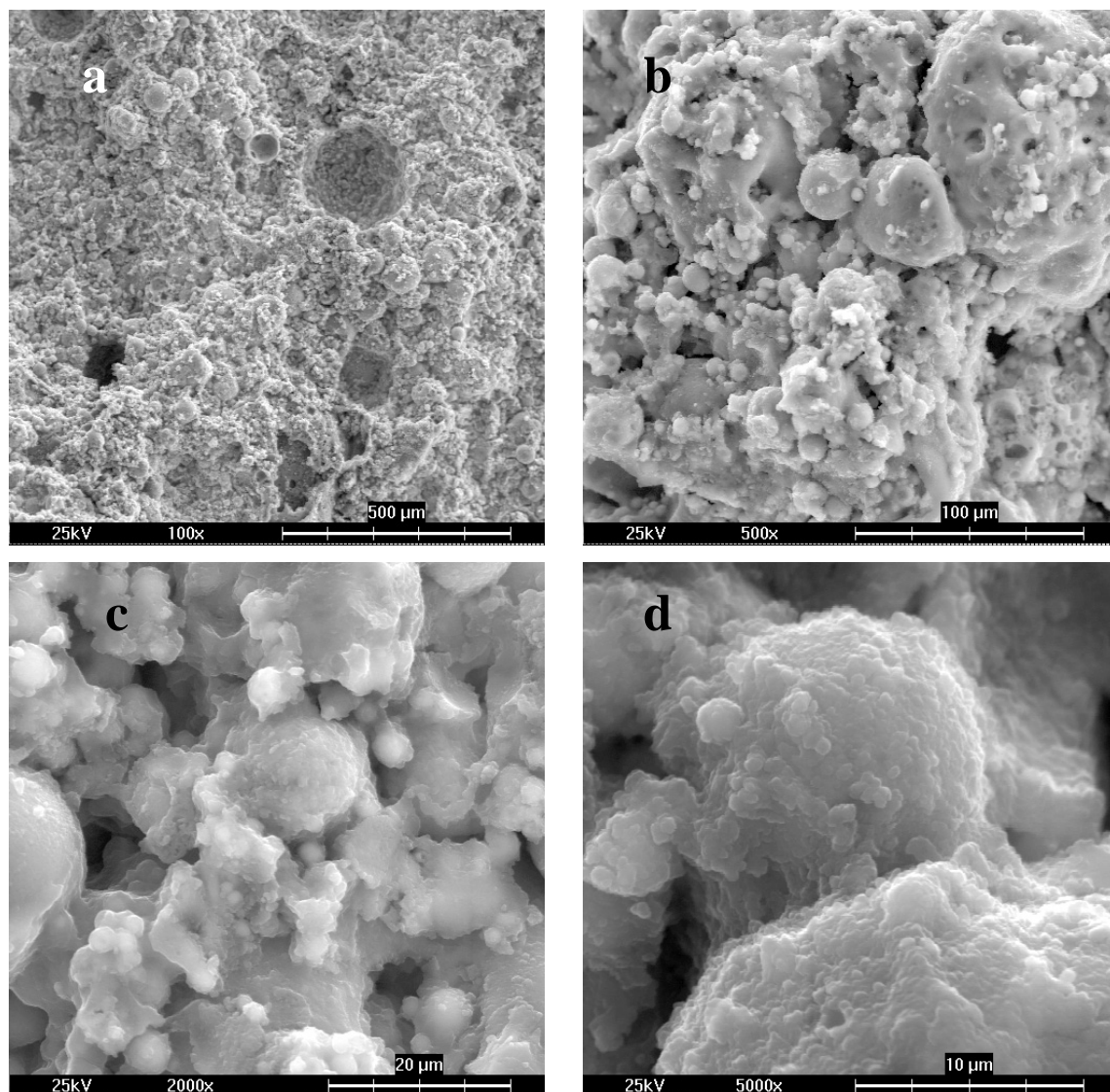
Na obrázku 17, zobrazujícím popílkovou matici aktivovanou vodním sklem se silikátovým modulem M_s 2,5, je při větším zvětšení patrné, že popílková zrna jsou o trochu více obalena reakčními produkty, oproti matici na obrázku 15. Matrice je méně porézní a výsledky porozimetrie dokonce ukazují, že ze všech popílkových past z dětmarovického popílku vykazuje nejmenší kumulativní objem pórů.



Obrázek 17. Snímky ztvrdlé popílkové pasty z popílku Dětmarovice, M_s 2,5;

a) 100× zvětšeno, b) 500× zvětšeno, c) 2000× zvětšeno, d) 5000× zvětšeno

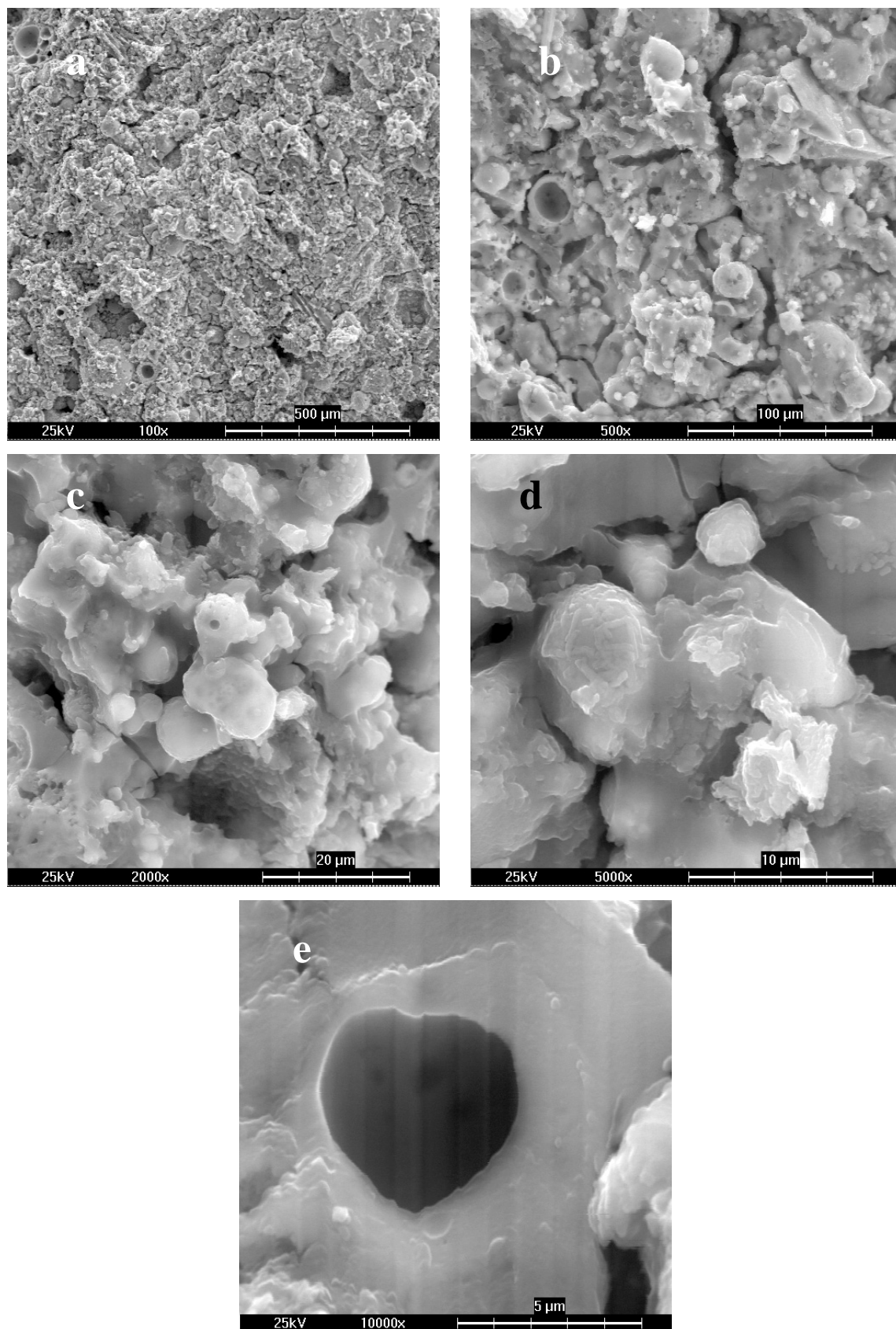
Obrázek 18 zachycuje popílkovou matici aktivovanou vodním sklem se silikátovým modulem 2,0. Je zde jasně patrný trend, že s klesajícím silikátovým modulem vodního skla je popílek více zreagován. Na povrchu jednotlivých zrn popílku je velké množství reakčních produktů, avšak matrice je porézní a výsledky porozimetrie ukazují, že má nejvyšší kumulativní obsah pórů ze všech popílkových past z dětmarovického popílku. Tato pasta vykázala také vysoký obsah kapilárních pórů, což zcela koresponduje s faktem, že byla vytvořena s vyšší hodnotou vodního součinitele.



Obrázek 18. Snímky ztvrdlé popílkové pasty z popílku Dětmárovice, M_s 2,0;

a) 100× zvětšeno, b) 500× zvětšeno, c) 2000× zvětšeno, d) 5000× zvětšeno

Na obrázku 19 jsou snímky popílkové pasty aktivované vodním sklem s modulem M_s 1,5. Jak je ze snímků patrné, jsou popílková zrna o trochu více zreagována než v případě pasty s M_s 2,0 a prostor mezi zrny je zaplněn hydratačními produkty, což vysvětluje vcelku nízkou porozitu.



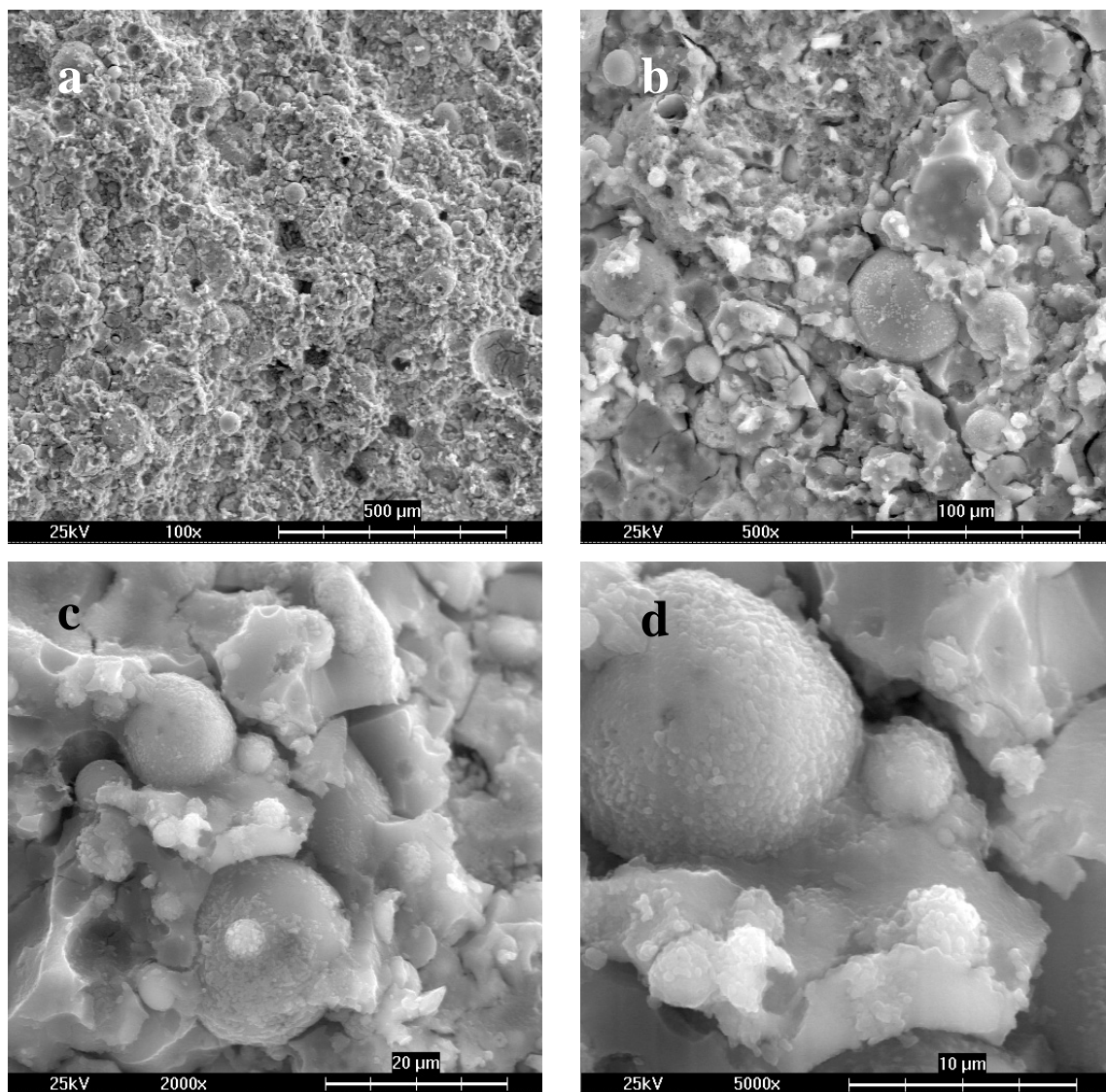
Obrázek 19. Snímky ztvrdlé popílkové pasty z popílku Dětmárovice, M_s 1,5;

a) 100× zvětšeno, b) 500× zvětšeno, c) 2000× zvětšeno, d) 5000× zvětšeno,

e) 10 000× zvětšeno

Obrázek 20 obsahuje snímky popílkové pasty aktivované vodním sklem s modulem M_s 1,0. Na snímcích je patrné, že popílková zrna značně zreagovala, avšak méně v porovnání s pastou aktivovanou vodním sklem s modulem M_s 1,5, to je možné vysvětlí skutečností, že zde byl použit vyšší vodní součinitel, což mělo za následek snížení koncentrace vodního skla a také zpomalení celé reakční kinetiky.

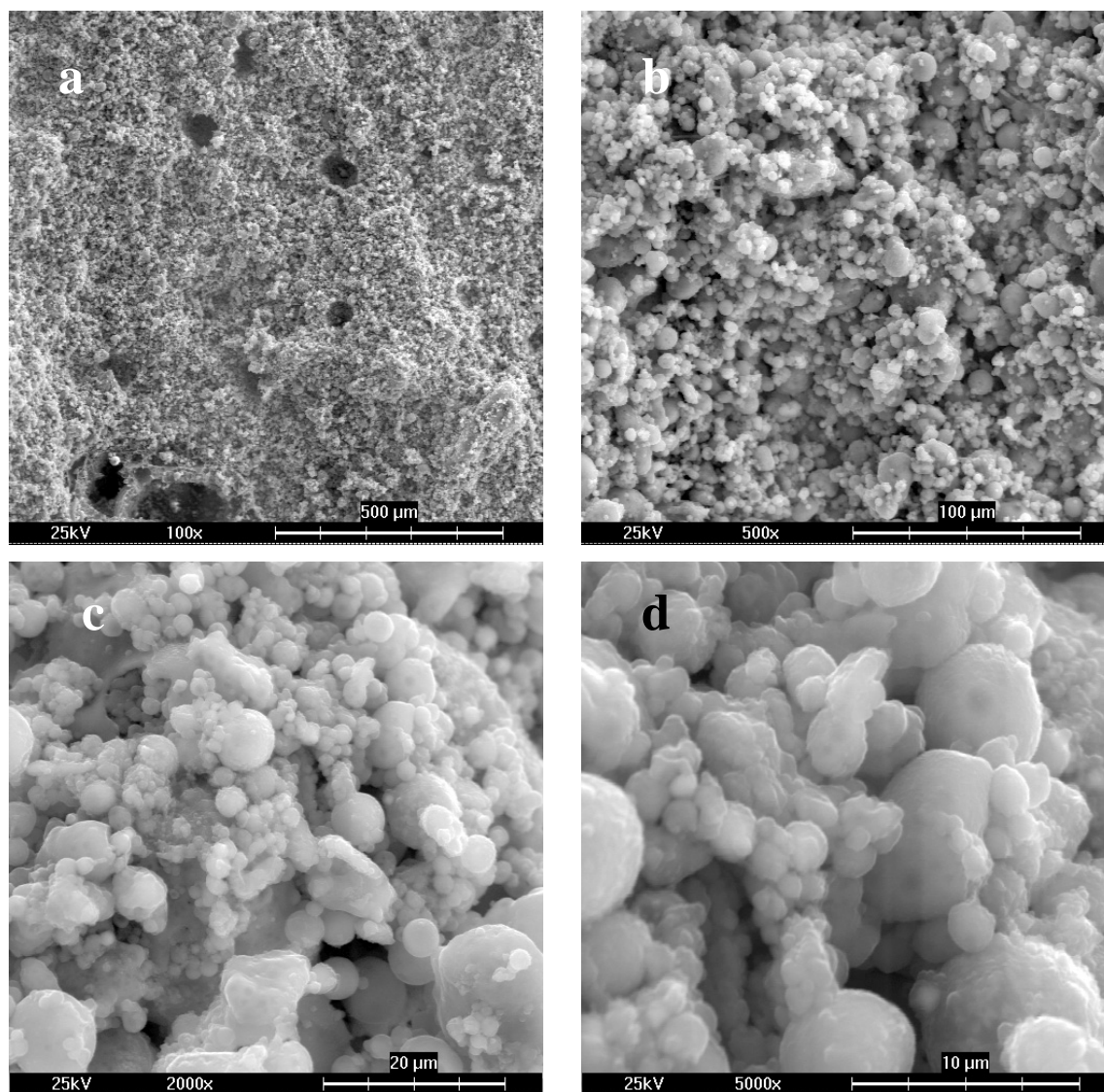
Je důležité také uvést fakt, že ve všech popílkových pastách z dětmarovického popílku se nacházejí pouze produkty alkalické aktivace, které mají silný amorfni charakter a nebyly zde identifikovány žádné druhotné krystalické fáze.



Obrázek 20. Snímky ztvrdlé popílkové pasty z popílku Dětmrovické, M_s 1,0; a) 100× zvětšeno, b) 500× zvětšeno, c) 2000× zvětšeno, d) 5000× zvětšeno

8.1.7.2 REM snímky popílkových past z popílku Chvaletice

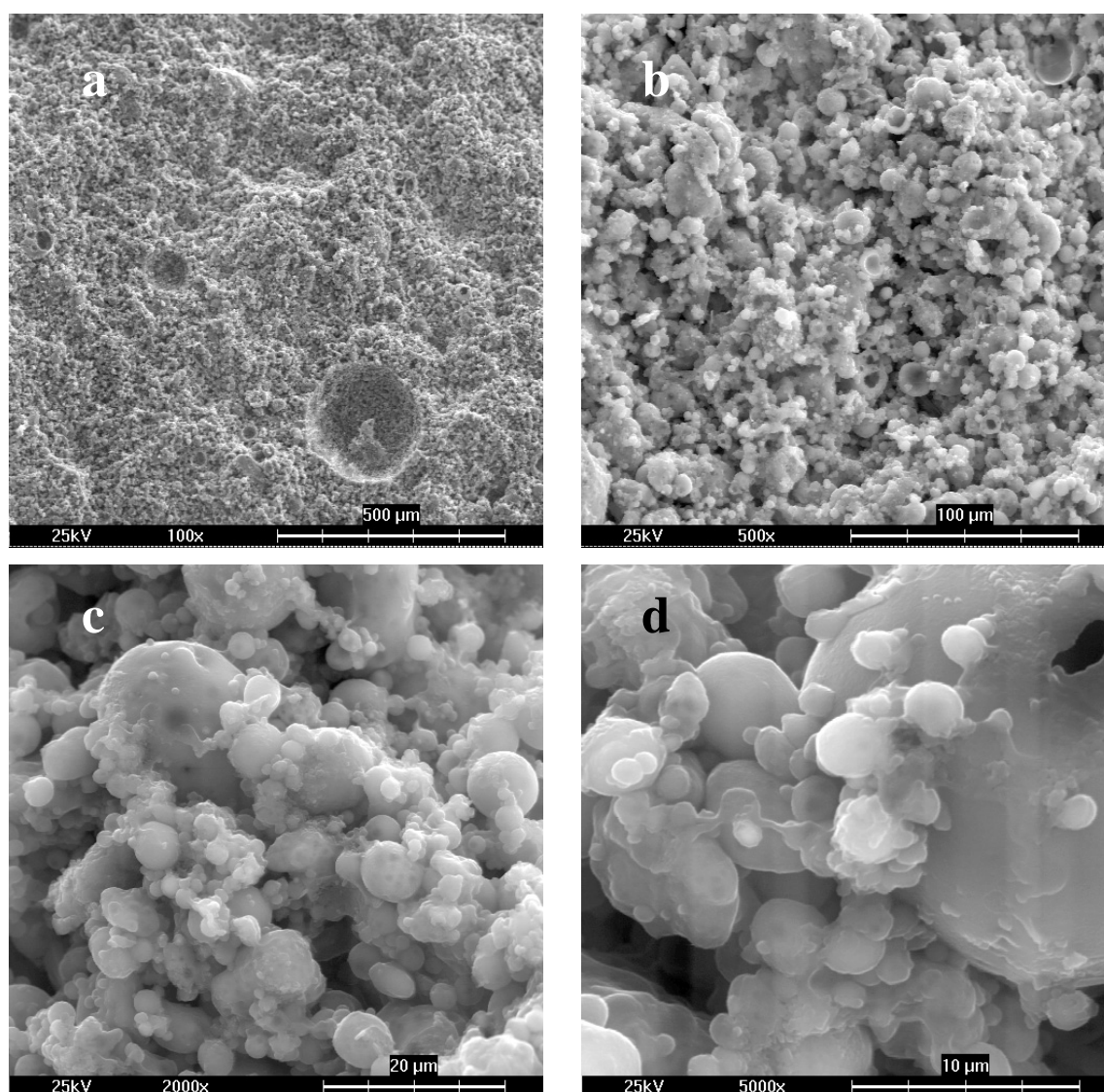
Na obrázku 21 jsou snímky ztvrdlé popílkové pasty z chvaletického popílku aktivované vodní sklem se silikátovým modulem M_s 3,23. Matrice je značně porézní a jednotlivá zrna popílku jsou velmi málo obalena reakčními produkty, což plně koresponduje s výsledky porozimetrie.



Obrázek 21. Snímky ztvrdlé popílkové pasty z popílku Chvaletice, M_s 3,23;

a) 100× zvětšeno, b) 500× zvětšeno, c) 2000× zvětšeno, d) 5000× zvětšeno

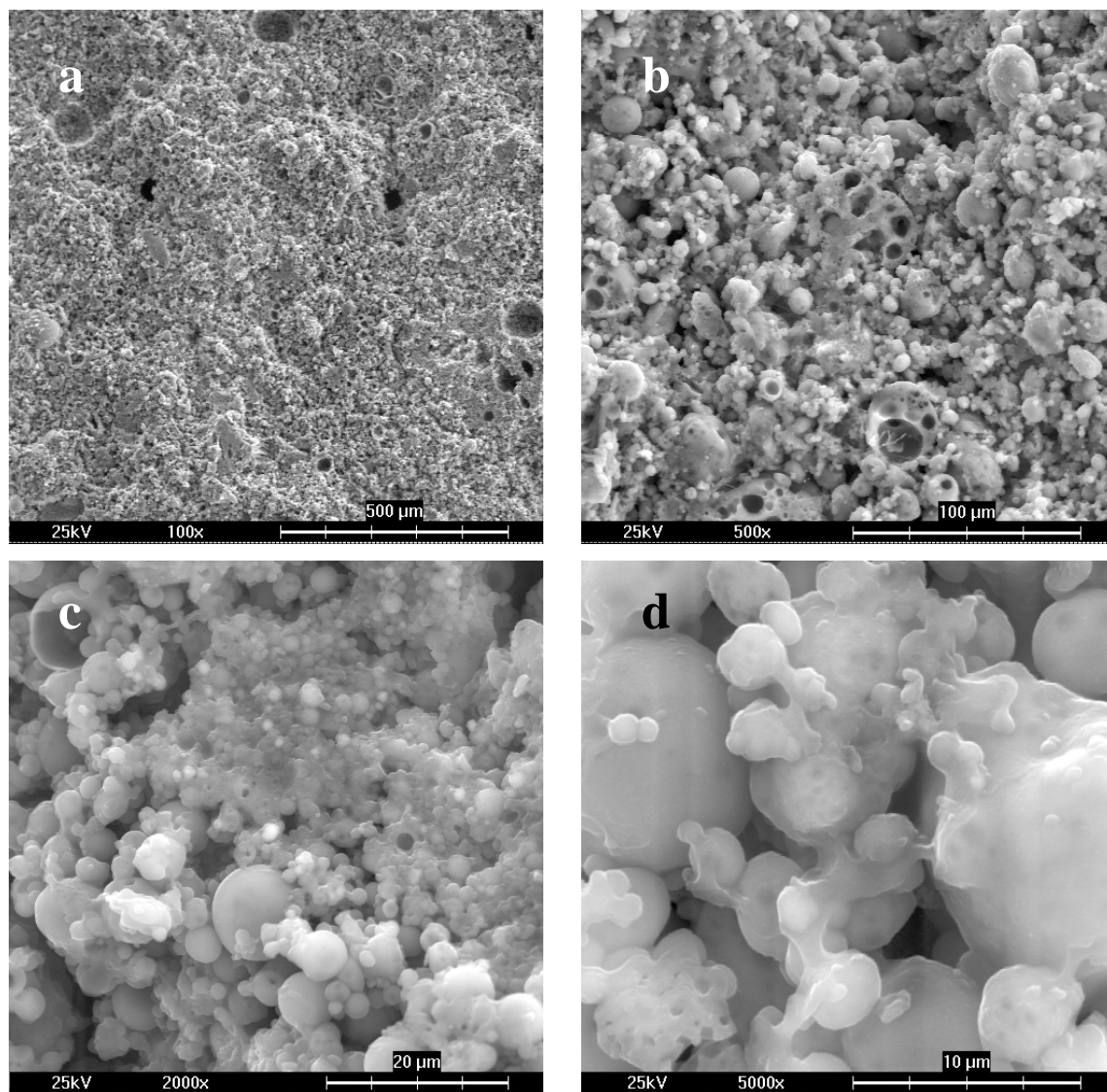
Obrázek 22 obsahuje snímky popílkové pasty aktivované vodním sklem s M_s 2,5. Matrice je zde také značně pórovitá, avšak méně v porovnání s předchozí pastou, což potvrzují i výsledky porozimetrie. Popílková zrna jsou zreagována v podobné míře, jako v pastě s M_s 3,23.



Obrázek 22. Snímky ztvrdlé popílkové pasty z popílku Chvaletice, M_s 2,5;

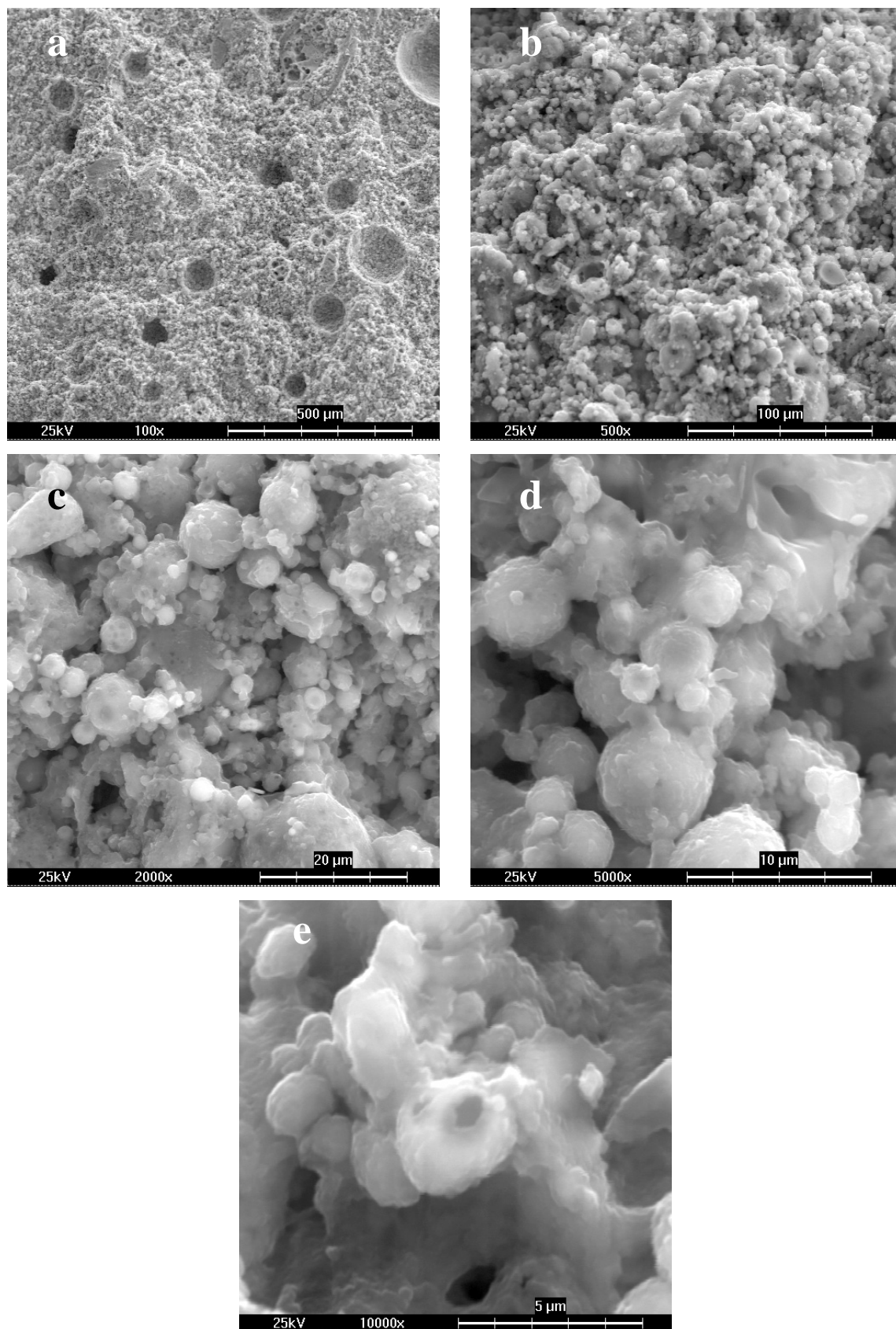
a) 100× zvětšeno, b) 500× zvětšeno, c) 2000× zvětšeno, d) 5000× zvětšeno

Obrázky 23, 24 a 25 se snímky popílkových past aktivovaných vodními skly s moduly 2,0; 1,5 a 1,0 potvrzují, že s klesajícím modulem roste míra zreagování popílku a klesá pórovitost matrice. Rovněž jako v případě ztvrdlých past z popílku dětmarovice, i zde nebyly objeveny žádné druhotné krystalické fáze jako produkt alkalické reakce popílku.

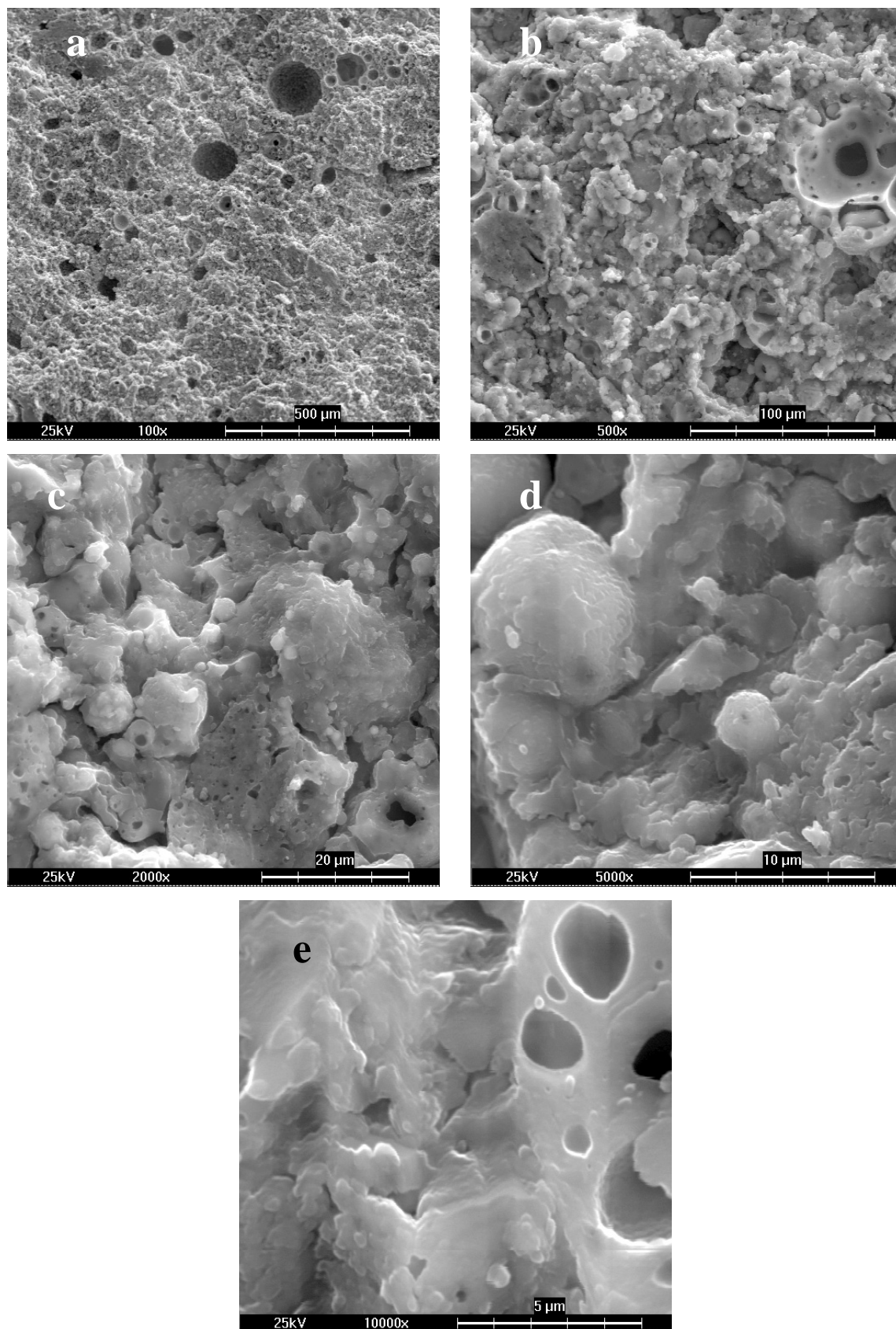


Obrázek 23. Snímky ztvrdlé popílkové pasty z popílku Chvaletice, M_s 2,0;

a) 100× zvětšeno, b) 500× zvětšeno, c) 2000× zvětšeno, d) 5000× zvětšeno



Obrázek 24. Snímky ztvrdlé popílkové pasty z popílku Chvaletice, M_s 1,5;
a) 100 \times zvětšeno, b) 500 \times zvětšeno, c) 2000 \times zvětšeno, d) 5000 \times zvětšeno,
e) 10 000 \times zvětšeno



Obrázek 25. Snímky ztvrdlé popílkové pasty z popílku Chvaletice, M_s 1,0;

a) 100× zvětšeno, b) 500× zvětšeno, c) 2000× násobné zvětšeno, d) 5000× zvětšeno,
e) 10 000× zvětšeno

8.2 Dřevokompozit s alkalicky aktivovanou popílkovou matricí

Tento dřevokompozit, jak již název napovídá, byl vytvořen z popílkové matrice a plnivem byla dřevní hmota ve formě štěpky. Byly vytvořeny 4 typy kompozitů, u nichž se měnil obsah plniva (dřevní štěpky) a pro srovnání byla namíchána čistě popílková matrice. Z namíchaných kompozitů a matrice byly vytvořeny krychle o hraně 150 mm. Od každého druhu kompozitu byly vytvořeny 4 krychle, z nichž na třech byla po 28 dnech stanovena objemová hmotnost a pevnost v tlaku. Na poslední krychli z celé sady byl stanoven součinitel tepelné vodivosti.

Navíc z jedné krychle byl vyříznut segment, který obsahoval jak matrici, tak dřevní výplň. Na tomto segmentu bylo pomocí REM zkoumáno spojení popílkové matrice s dřevní štěpkou.

8.2.1 Výběr popílkové matrice pro vytvoření dřevokompozitu

Výběr popílkové matrice byl proveden pomocí optimalizačního výpočtu, ve kterém byla váha jednotlivých kritérií určena metodou párového srovnání (Fullerův trojúhelník) a metodou kvantitativního párového srovnání (Saatyho matice).¹⁰²

Nejprve jsem si zvolil posuzovaná kritéria. Z vybraných kritérií a jejich konkrétních hodnot jsem sestavil rozhodovací matici (tabulka 20), ve které byla určena jednotlivá optima. Do celého optimalizačního výpočtu byly zařazeny pouze matrice, které byly vybrány pro zkoušení dob tuhnutí, jelikož ostatní matrice vykazovaly velice pomalé tuhnutí.

Tabulka 20. *Data jednotlivých variant*

Číslo.Kritérium	Varianty						Optimum
	M _s 2,0 30%	M _s 2,0 40%	M _s 1,5 30%	M _s 1,5 40%	M _s 1,0 30%	M _s 1,0 40%	
1. Pevnost v tlaku [MPa]	6,4	6,9	6,9	14,9	10,1	8,3	Max
2. Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1,5	1,6	4,1	2,7	3,4	1,4	Max
3. Počátek tuhnutí [min]	75	175	380	2160	910	1920	Min
4. Konec tuhnutí [min]	180	205	410	2300	1400	1940	Min

Po té byly spočteny váhy jednotlivých kritérií dle obou metod. Při výpočtu dle metody párového srovnání byl nejprve sestaven Fullerův trojúhelník, neboli tabulka 21, ve které

jsou vždy srovnávána dvě kritéria a je určováno, které z nich má větší váhu za což je mu přiřazen bod. Dle počtu získaných bodů byla jednotlivým kritériím v tabulce 22 sestupně přiřazena pořadová čísla P_i a vypočteny váhy jednotlivých kritérií dle daných vzorců.

Tabulka 21. *Fullerův trojúhelník*

1	1	1
2	3	4
2	2	
3	4	
3		
4		

- modře podbarvená pole označují vždy kritéria s vyšší hladinou významnosti

Tabulka 22. *Výpočet váhy kritérií*

Číslo kritéria	Body	P_i	V_i	F_i
1	1	3	2	0,2000
2	0	4	1	0,1000
3	2	2	3	0,3000
4	3	1	4	0,4000
Σ	6		10	1,0000

Výpočtové vzorce:

P_i – pořadí dle počtu obdržení bodů

$$V_i = n + 1 - P_i$$

$$F_i = \frac{V_i}{\Sigma V_i}$$

F_i - váha kritéria

Druhý způsob výpočtu váhy kritérií byl prováděn dle metody kvantitativního párového srovnání pomocí Saatyho matice. V Saatyho matici jsou srovnávána vždy dvě kritéria a čísla která matice obsahuje, vypovídají kolikrát je dané kritérium více či méně důležité než kritérium druhé. Následně byla dle daných vzorců vypočtena váha jednotlivých kritérií, jak je možno vidět v tabulce 22.

Tabulka 22. Saatyho matice

	1	2	3	4	S_{ij}	R_{ij}	F_i
1	1	7	1/3	1/4	0,58333	0,8739	0,163
2	1/7	1	1/4	1/5	0,00714	0,2907	0,054
3	3	4	1	1/3	4	1,4142	0,264
4	4	5	3	1	60	2,7832	0,519
					Σ	5,362	1,000

Výpočtové vzorce:

$$S_{ij} = \prod_{j=1}^n s_{ij};$$

$$R_{ij} = (S_{ij})^{1/n}$$

$$F_i = \frac{R_{ij}}{\sum_{i=1}^n R_{ij}}$$

Dalším krokem bylo určení maxima a minima jednotlivých kritérií, které jsou uvedeny v tabulce 23. Následně byla vytvořena výpočtová matice, označená jako tabulka 24, v níž byly hodnoty kritérií jednotlivých variant přetransformovány na bezrozměrná čísla b_{ij} dle daných vzorců.

Tabulka 23. Zjištění maxima a minima jednotlivých kritérií

Číslo kritéria	Varianta						Max	Min
	M_s 2,0 30%	M_s 2,0 40%	M_s 1,5 30%	M_s 1,5 40%	M_s 1,0 30%	M_s 1,0 40%		
1	6,4	6,9	6,9	14,8	10,1	8,3	14,8	6,4
2	1,5	1,6	4,1	2,7	3,4	1,4	4,1	1,4
3	75	175	380	2160	910	1920	2160	75
4	180	205	410	2300	1400	1940	2300	180

Tabulka 24. Výpočtová matice

Číslo kritéria	Varianta (b_{ij})					
	M_s 2,0 30%	M_s 2,0 40%	M_s 1,5 30%	M_s 1,5 40%	M_s 1,0 30%	M_s 1,0 40%
1	0,0000	0,0595	0,0595	1,0000	0,4405	0,2262
2	0,0519	0,0630	1,0000	0,4815	0,7407	0,0000
3	1,0000	0,9520	0,8537	0,0000	0,5995	0,1151
4	1,0000	0,9882	0,8915	0,0000	0,4245	0,1698

Výpočtové vzorce :

$$\text{Max.....} b_{ij} = \frac{a_{ij} - \text{MIN}(a_{ij})}{\text{MAX}(a_{ij}) - \text{MIN}(a_{ij})}$$

$$\text{Min.....} b_{ij} = \frac{\text{MAX}(a_{ij}) - a_{ij}}{\text{MAX}(a_{ij}) - \text{MIN}(a_{ij})}$$

Dále byly vytvořeny výpočtové matice, do nich dosazeny váhy jednotlivých kritérií zjištěných oběma metodami a vypočtena optima. Každá hodnota b_{ij} byla vždy přezásobena váhu příslušného kritéria. U každé varianty byl proveden součet všech hodnot b_{ij} , přezásoben stem a nejvyšší dosažený výsledek lze poté považovat za optimum. V tabulce 25 je výpočet proveden s hodnotami váhy kritérií získaných dle metody párového srovnání a v tabulce 26 jsou dosazené váhy kritérií získány metodou kvantitativního párového srovnání.

Tabulka 25. Výpočtová matice s dosazenými vahami kritérií dle párového srovnání

Číslo kritéria	Varianta (b_{ij})						Fi
	Ms 2,0 30%	Ms 2,0 40%	Ms 1,5 30%	Ms 1,5 40%	Ms 1,0 30%	Ms 1,0 40%	
1	0,0000	0,0119	0,0119	0,2000	0,0881	0,0452	0,200
2	0,0052	0,0063	0,1000	0,0481	0,0741	0,0000	0,100
3	0,3000	0,2856	0,2561	0,0000	0,1799	0,0345	0,300
4	0,4000	0,3953	0,3566	0,0000	0,1698	0,0679	0,400
Σ	0,7052	0,6991	0,7246	0,2481	0,5118	0,1477	1,000
*100	70,52	69,91	72,46	24,81	51,18	14,77	100,00

Tabulka 26. Výpočtová matice s dosazenými vahami kritérií dle kvantitativního párového srovnání

Číslo kritéria	Varianta (b_{ij})						Fi
	Ms 2,0 30%	Ms 2,0 40%	Ms 1,5 30%	Ms 1,5 40%	Ms 1,0 30%	Ms 1,0 40%	
1	0,0000	0,0097	0,0097	0,1630	0,0718	0,0369	0,163
2	0,0028	0,0034	0,0540	0,0260	0,0400	0,0000	0,054
3	0,2640	0,2513	0,2254	0,0000	0,1583	0,0304	0,264
4	0,5190	0,5129	0,4627	0,0000	0,2203	0,0881	0,519
Σ	0,7858	0,7773	0,7518	0,1890	0,4904	0,1554	1,000
*100	78,58	77,73	75,18	18,90	49,04	15,54	100,00

Z důvodu co nejobektivnějšího výsledku byly výsledky z obou metod sečteny v tabulce 27 a konečné optimum bylo uvažováno jako nejvyšší z těchto součtů.

V konečném rozhodnutí bylo kromě výsledku optimalizačního výpočtu třeba také uvážit míru zreagování popílku v jednotlivých popílkových pastách a rovněž rozhodnout, jaká varianta bude více vhodná z hlediska částečného ošetření štěpky alkalickým aktivátorem

Tabulka 27. *Součet procentuálních bodů z obou užitých metod*

	Varianta					
	M _s 2,0 30%	M _s 2,0 40%	M _s 1,5 30%	M _s 1,5 40%	M _s 1,0 30%	M _s 1,0 40%
Součet procent z obou metod	149,1	147,64	147,64	43,71	100,22	30,31

Dle součtu obou metod optimalizačního výpočtu vzešla jako optimální varianta M_s 2,0 30 %. Nejlepšího výsledku dosáhla díky tomu, že dosahuje nejlepších hodnot v nejpreferovanějších kritériích počátku a konce tuhnutí. Avšak tato varianta je následována variantami M_s 2,0 40 % a M_s 1,5 30 %. Tyto dvě zbylé varianty dosáhly v součtu obou metod totožného výsledku, který byl o pouhých 1,5 % horší nežli výsledné optimum. Navíc v případě druhé metody – tedy kvantitativního párového srovnání, dosáhla varianta M_s 2,0 40 % o necelé procento horšího výsledku. Jelikož je tato druhá metoda více vypovídající a míra zreagování past se silikátovým modulem M_s 1,5 a M_s 2,0 byla velmi podobná, a navíc s klesajícím silikátovým modulem roste riziko při práci s vodním sklem (s klesajícím silikátovým modulem stoupá alkalita roztoku, neboli žíravost), konečné rozhodování probíhalo mezi variantami M_s 2,0 30 % a M_s 2,0 40 %. Dále jsem bral v úvahu skutečnost, že varianta, která skončila druhá v pořadí, vykazovala vyšší pevnost v tlaku. A navíc tato varianta obsahuje vyšší dávku aktivátoru, což by v konečném důsledku, při vytváření štěpko-popílkového kompozitu mohlo hrát důležitou roli z hlediska nasákavosti štěpky a možného nedostatku alkalického aktivátoru pro zreagování popílku v dostatečné míře. Ze všech zmíněných důvodů jsem jako optimální variantu vybral M_s 2,0 40 %, která se umístila jako druhá v pořadí.

8.2.2 Složky kompozitu

8.2.2.1 Popílková matrice

Na základě výše uvedených skutečností byla vybrána matrice M_s 2,0 D 40. Popílková matrice byla vytvořena z těchto komponent:

- popílek Dětmarovice
- sodné vodní sklo M_s 2,0 s hustotou $\rho = 1397 \text{ kg/m}^3$
- voda z vodovodního řadu

8.2.2.2 Dřevní štěrka

Použitá dřevní štěrka byla získána při pilařské výrobě z odkorněného dříví. Dle klasického dělení se jedná o bílou štěrku určenou primárně do papírenského průmyslu. Tato štěrka není tvořena pouze z jednoho druhu dřeva, nýbrž se jedná o kombinaci smrkového a borovicového dřeva v poměru 60 : 40. Frakce štěrky byla do 35 mm.

Štěpka nebyla oproti běžným zvyklostem mineralizována. Její ošetření bylo provedeno pouze ve formě odležení na venkovní zpevněné ploše po dobu 14 dnů. Toto odležení by mělo způsobit vyplavení cukrů z dřeva. Ale i tento způsob ošetření byl zřejmě zbytečný, jelikož dle mých zjištěných informací, doposud nikdo nezkoumal interakci mezi cukry vyluhovatelnými z dřevěné hmoty a alkalicky aktivovaným popílkem. Z tohoto důvodu jsem zvolil jako premisu myšlenku, že tyto cukry nijak neovlivňují reakci alkalicky aktivovaných popílků. Dalším důvodem proč nebylo provedeno klasické ošetření štěrky (mineralizace) je fakt, že v dřevocementových kompozitech je dřevní výplň mineralizována často vodním sklem, a jelikož je vodní sklo jednou ze složek mnou zkoumaného dřevokompozitu, očekávám, že štěrky budou částečně vodním sklem ošetřeny při samotném míchání kompozitu. Nejvýznamnějším důvodem proč jsem štěrky nemineralizoval, byla skutečnost, že jsem se snažil co nejvíce zjednodušit proces vytvoření dřevokompozitu.

8.2.2.2.1 Objemová hmotnost dřevní štěrky

Objemová hmotnost štěrky byla určena pouze orientačně, jelikož znalost této veličiny byla potřebná pouze pro výpočet složení jednotlivých směsí dřevokompozitů. Objemová hmotnost byla stanovena stejným způsobem jako v případě kameniva, tedy v odměrném válci. Odvážené množství štěrky ($m = 0.130 \text{ kg}$) bylo nasypáno do odměrného válce a dolito vodou ($V_0 = 0,00066 \text{ m}^3$). Následně byla odečtena hodnota celkového objemu směsi těchto dvou složek ($V_1 = 0,001 \text{ m}^3$). Celý proces měření byl proveden velice rychle,

aby se zabránilo přílišnému zkreslení výsledné hodnoty, díky nasákavosti dřeva. Výpočet objemu štěpky byl proveden dle následujícího vzorce :

$$\rho = \frac{m}{V_1 - V_0} [\text{kg/m}^3]$$

$$\rho = \frac{0,130}{0,001 - 0,00066} = 382,23 \text{ kg/m}^3 \approx 380 \text{ kg/m}^3$$

8.2.3 Složení jednotlivých směsí kompozitů

Výpočet složení jednotlivých směsí kompozitu byl proveden dle rovnice absolutních objemů a složení jednotlivých směsí kompozitů je uvedeno v tabulce 28.

Tabulka 28. Složení jednotlivých kompozitních směsí

Označení	Složky kompozitních směsí				w
	popílek [kg]	vodní sklo [kg]	štěpka [kg]	voda [kg]	
Referenční	18,74	7,50	0,00	1	0,329
5 % štěpky	15,85	6,34	0,79	1	0,338
10 % štěpky	13,73	5,49	1,37	1	0,348
15 % štěpky	12,11	4,84	1,82	2	0,440
20 % štěpky	10,84	4,34	2,17	4,5	0,690

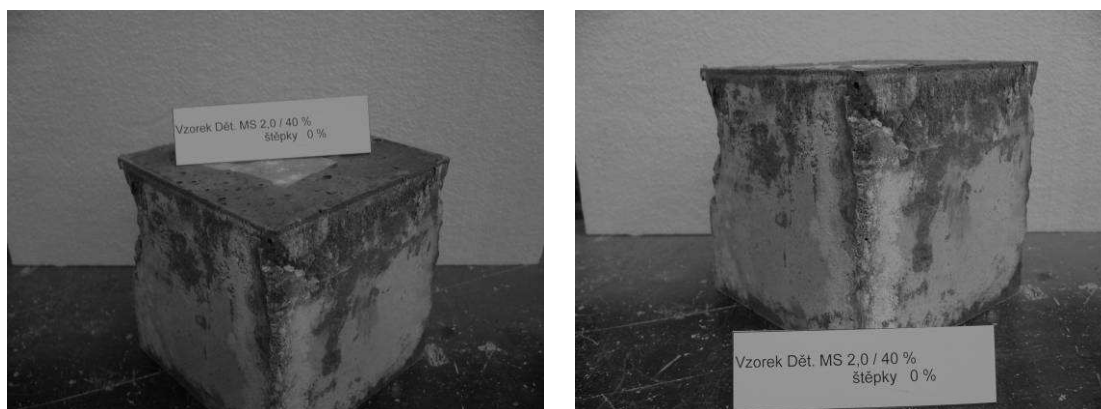
8.2.4 Míchání a ošetřování kompozitů

Jednotlivé složky kompozitu byly váženy pomocí vah typu Kern DE 36K10NL (d= 5 g). Míchání bylo prováděno v talířové míchačce na beton. Nejprve byl smíchán popílek s vodním sklem a dávkována voda pro zajištění spíše tekutější konzistence, následně byly přidány štěpky a nadávkována další část vody. V případě referenční směsi probíhalo míchání stejně s tím rozdílem, že nebyly dávkovány štěpky a druhá část vody. Avšak i u referenční směsi bylo nutné vytvořit spíše tekutější konzistenci z důvodu možného porovnání s dřevokompozity.

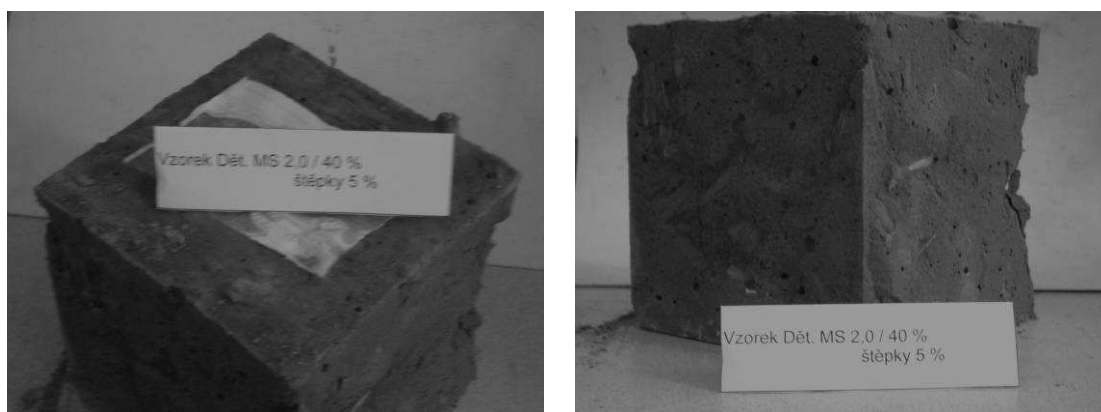
Po zamíchání byla směs uložena do ocelových krychlových forem o hraně 150 mm a 30 sekund „vibro-lisována“ na vibračním stole a za pomoci desky se závažím, které vytvářelo přítlak, jenž měl simulovat lisování. Avšak váha závaží byla pouze 14,5 kg, což znamená přítlak 0,0145 kN, kdežto v běžných vibrolisech je minimální hodnota přítlaku razníku 5 kN.¹⁰⁶ Vzorky byly uloženy v při teplotě cca 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu cca 50 % až do zkoušení (28 dní). Vzorky byly odformovány do 5 dní od vytvoření.

Na obrázcích 26–30 jsou fotografie vzorků ve stáří 28 dnů, na nichž je možné sledovat

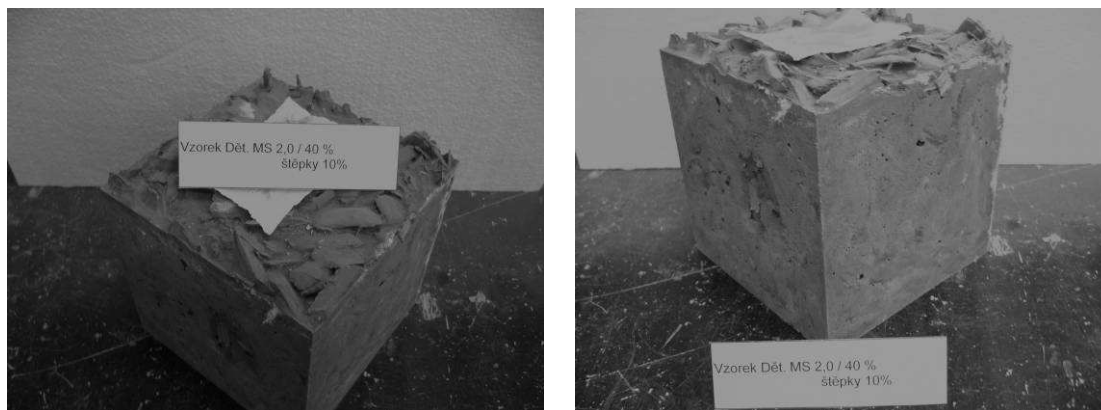
několik aspektů. Je jasné patrné, že se stoupající dávkou štěrky klesá celková soudržnost kompozitu, což je způsobeno nižší dávkou vodního skla, a tedy menší mírou zreagování popílku. Tento aspekt, je umocněn faktem, že dřevo je vysoce nasákavé, a tak část vodního skla je adsorbována štěpkou. Extrémní případ této závislosti soudržnosti kompozitu na dávce štěrky je pozorovatelný u vzorků s 20 % dřevní štěrky. Tyto vzorky neměly prakticky žádnou pevnost a docházelo k jejich postupnému rozpadu. Dále je možné sledovat, že zavedením štěrky do popílkové matrice klesla výkvětovitost, což je také spojeno s faktem, že dřevo absorbuje část vodního skla.



Obrázek 26. Referenční vzorek s 0 % štěrky ve stáří 28 dní



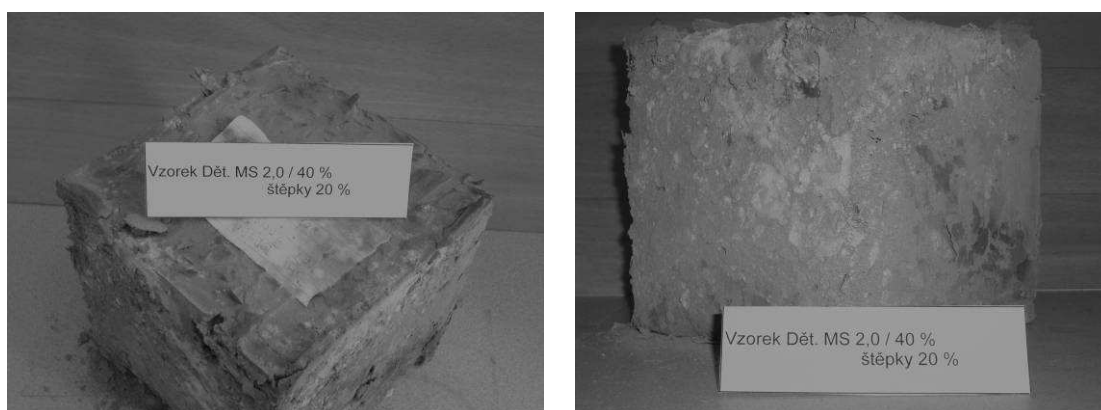
Obrázek 27. Dřevokompozit s 5 % štěrky ve stáří 28 dní



Obrázek 28. Dřevokompozit s 10 % štěpky ve stáří 28 dní



Obrázek 29. Dřevokompozit s 15 % štěpky ve stáří 28 dní



Obrázek 30. Dřevokompozit s 20 % štěpky ve stáří 28 dní

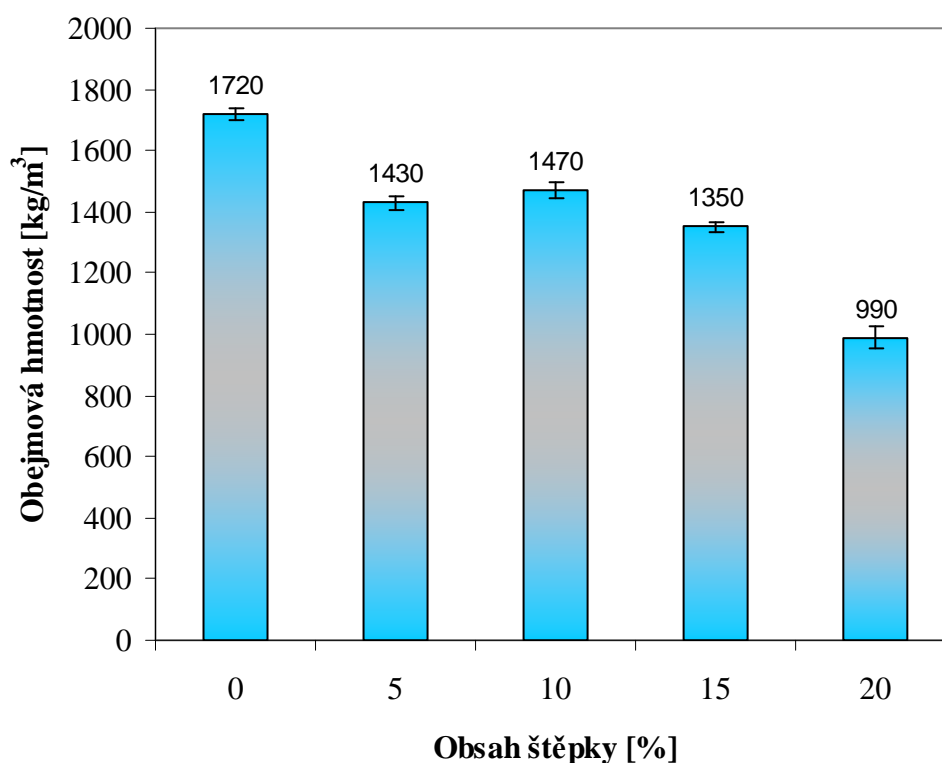
8.2.5 Objemová hmotnost dřevokompozitu

Objemová hmotnost byla stanovena dle ČSN EN 12390-7.¹⁰⁷ Měření bylo prováděno pomocí posuvného měřidla a vah typu EXCELL (d=5 g). Výsledky průměrných objemových hmotností dřevokompozitů a referenčních vzorků jsou uvedeny v tabulce 29 a

na obrázku 31. Výsledky objemových hmotností jsou ovlivněny jedním zásadním faktorem. Při odformování docházelo k odlupování svrchních částí vzorků, jelikož ulpívaly na stěnách formy. Tento problém je zapříčiněn faktem, že bylo užito separačního prostředku určeného pro výrobky z betonu a v případě AAP tento separátor nebyl dostatečně účinný.

Tabulka 29. *Objemová hmotnost dřevokompozitů*

Dávka štěpek [%]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m^3]	Směrodatná odchylka σ
0	1720	20,00
5	1430	23,09
10	1470	25,17
15	1350	17,32
20	990	36,06



Obrázek 31. *Průměrná objemová hmotnost jednotlivých druhů kompozitů*

8.2.6 Pevnost v tlaku dřevokompozitu

Pevnost v tlaku byla zkoušena dle ČSN EN 12390-3.¹⁰⁸ Zkušební tělesa $150 \times 150 \times 150$ mm ve stáří 28 dní byla zatěžována v lisu rychlostí od 0,5 do 1,0 MPa/s. Výsledné pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tabulce 30 a na obrázku 32. Na obrázku 33 je

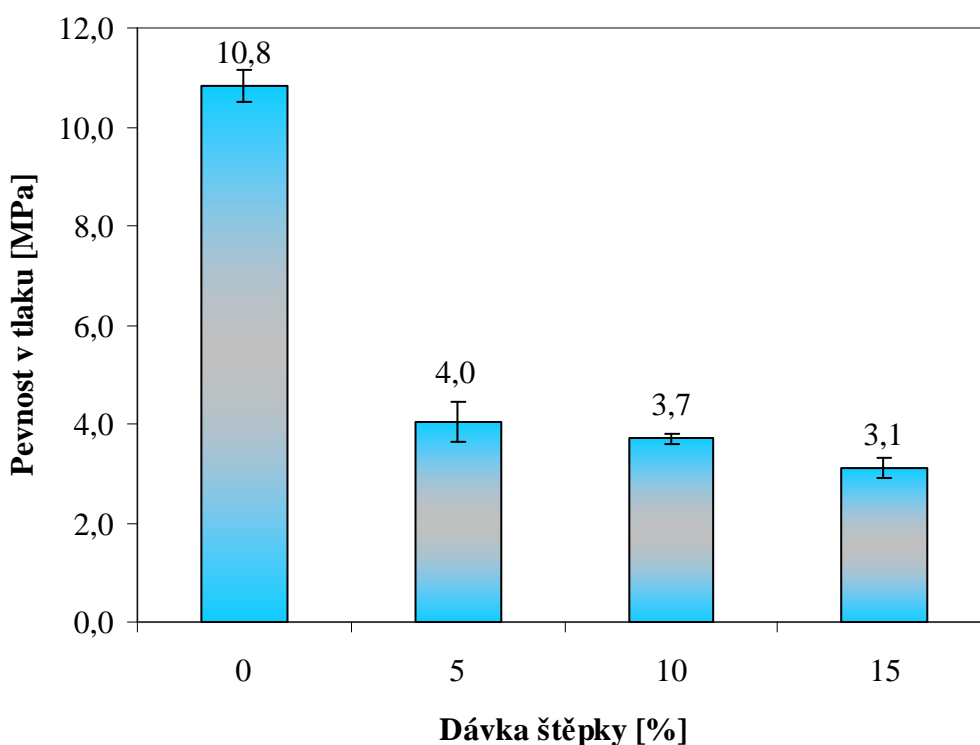
možno vidět způsob deformace dřevokompozitu, která se nijak zvlášť neliší od způsobu deformace krychle vytvořené z betonu.

Výsledky pevností v tlaku jasně ukazují, že přidavek dřevní štěpky má za následek enormní snížení pevnosti. Toto snížení je způsobeno nejspíše dvěma faktory.

Prvním faktorem je skutečnost, že dřevní štěpka díky velké nasákavosti odebrala během míchání kompozitu značné množství vodního skla a popílek tudíž nemohl dostatečně zreagovat. Druhým faktorem může být zvýšení pórovitosti vnesením štěpky do popílkové matrice a zvýšená pórovitost obecně snižuje pevnosti.

Tabulka 30. *Pevnosti v tlaku dřevokompozitů*

Dávka štěpky [%]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]	Směrodatná odchylka σ
0	10,8	0,31
5	4,0	0,41
10	3,7	0,10
15	3,1	0,20



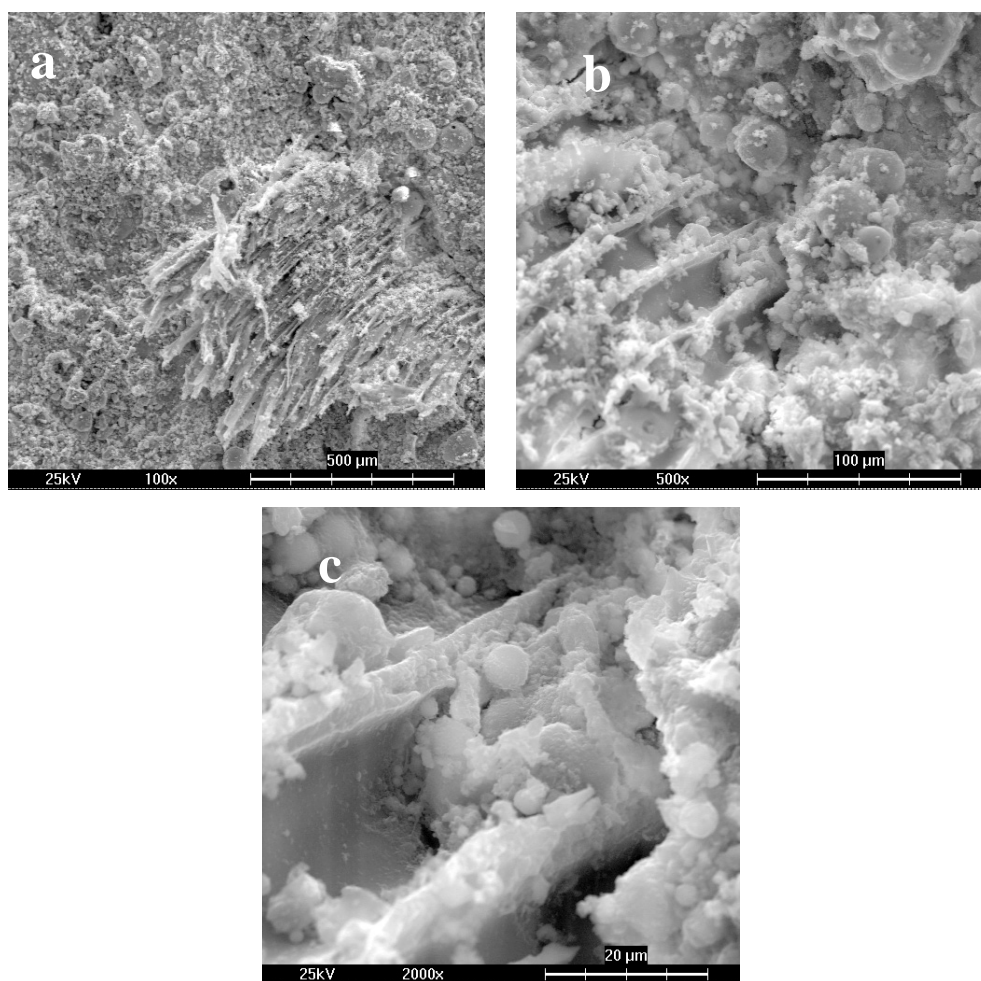
Obrázek 32. *Průměrná pevnost v tlaku jednotlivých druhů dřevokompozitů*



Obrázek 33. *Způsob porušení dřevokompozitu*

8.7.2.7 REM rozhraní matrice/štěpka

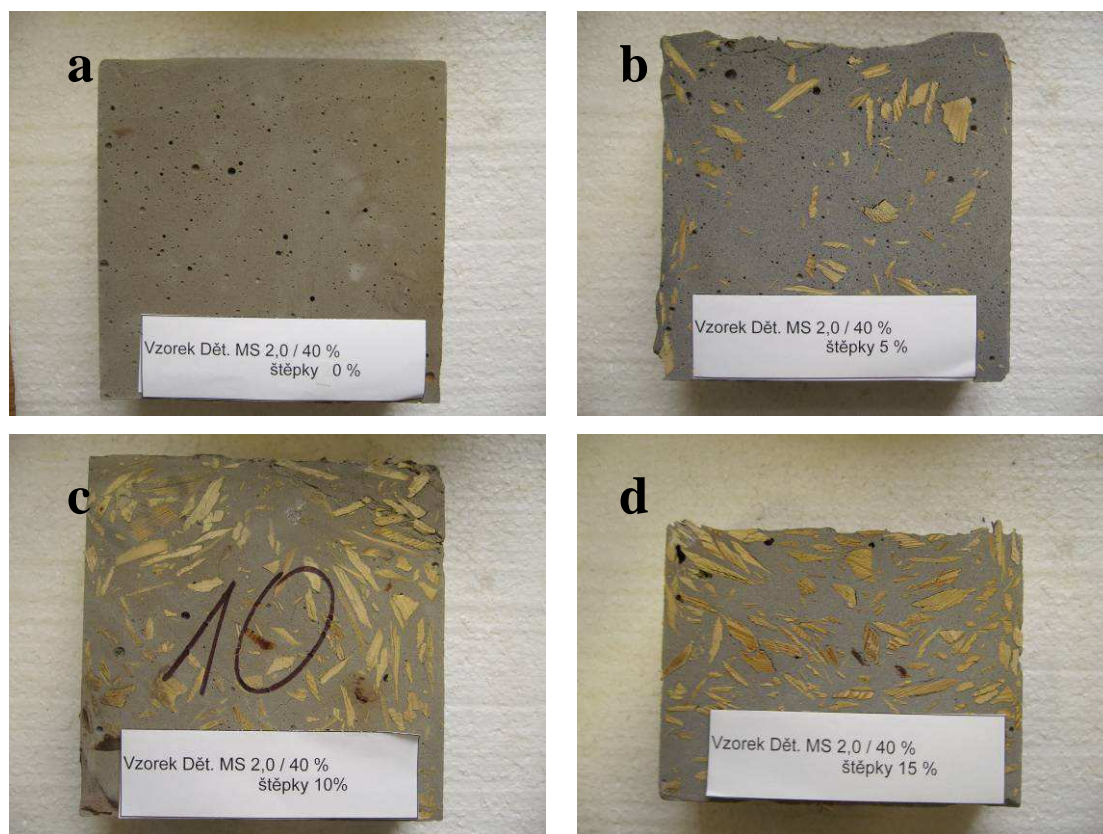
Pomocí elektronového mikroskopu bylo vyšetřováno rozhraní mezi popílkovou maticí a dřevěnou štěpkou. Jak je patrné ze snímků na obrázku 34, popílek vcelku dobře obalil dřevní štěpku. Lze říci, že zreagoval i uvnitř pórů a tracheid.



Obrázek 34. *Snímky rozhraní matrice/štěpka; a) 100× zvětšeno, b) 500× zvětšeno, c) 2000× zvětšeno*

8.2.8 Součinitel tepelné vodivosti

Měření bylo prováděno přístrojem Shotherm firmy Shova Denco, který pracuje na principu metody topného drátu, ale jelikož je tepelný zdroj integrován uvnitř měřicí sondy přístroje, tak se tato měřicí metoda nazývá metoda „horkého drátu“. Měření metodou topného drátu, je upraveno normou ČSN EN 993-14.¹⁰⁹ Nedodržel jsem normový požadavek na minimální rozměry vzorku $200 \times 100 \times 50$ mm. Mnou použité vzorky byly 50 mm tlusté pláty nařezané z krychlí $150 \times 150 \times 150$ mm a v tomto důsledku byly rozměry vzorků $150/120 \times 150 \times 50$ mm. Tyto vzorky jsem před měřením umístil na 24 hodin do sušárny při teplotě 105°C . Vzorky připravené pro měření tepelné vodivosti jsou na obrázku 35. U každého vzorku jsem provedl 5 měření, z nichž jsem vypočetl průměrnou hodnotu λ . Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 30 a na obrázku 36.



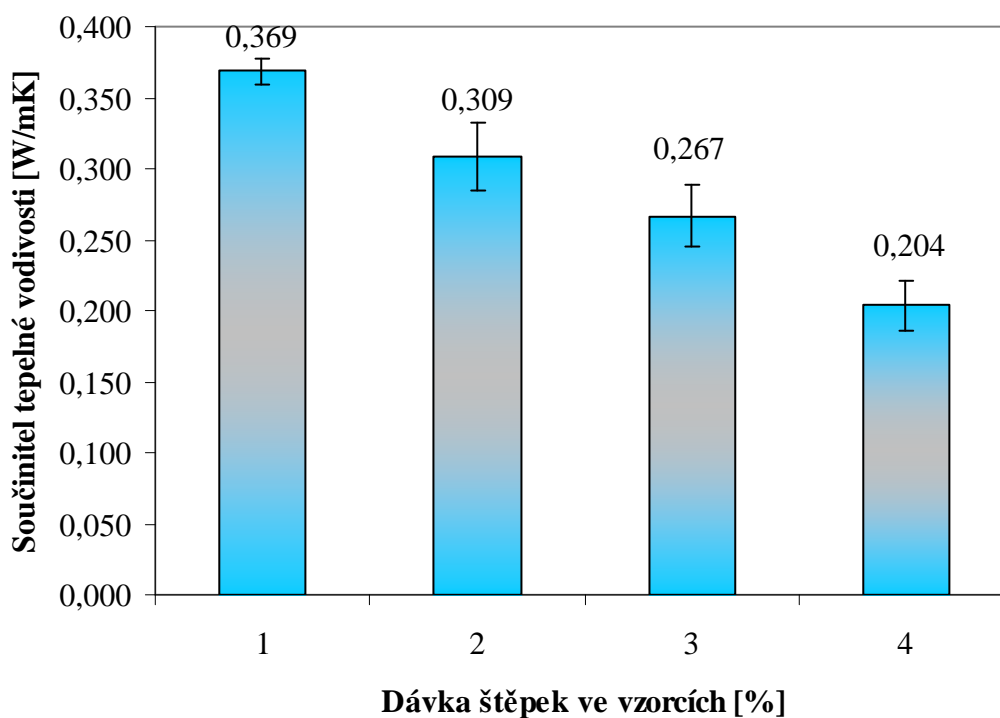
Obrázek 35. Fotografie vzorků připravených pro určení součinitele tepelné vodivosti; a) referenční vzorek, b) vzorek s 5 % štěpky, c) vzorek s 10 % štěpky, d) vzorek s 15 % štěpky

Z výsledků stanovení součinitele tepelné vodivosti vyplývají dva základní závěry. Prvním a vcelku očekávaným závěrem je skutečnost, že se stoupající dávkou dřevěných

štěpek v kompozitu klesá součinitel tepelné vodivosti, jelikož dřevo má nižší tepelnou vodivost než AAP. Dále je bohužel nutno konstatovat, že i když se díky 15 % dávce dřevěných štěpek podařilo snížit součinitel tepelné vodivosti o 45 %, stále se nedá tento kompozit považovat za tepelný izolant, jelikož tepelné izolanty nabývají hodnot součinitele tepelné vodivosti menších nežli 0,1 W/mK.

Tabulka 30. *Součinitelé tepelné vodivosti dřevokompozitů*

Dávka štěpky [%]	Průměrný součinitel tepelné vodivosti [W/mK]	Směrodatná odchylka σ
0	0,3686	0,009
5	0,3087	0,024
10	0,2665	0,022
15	0,2036	0,018



Obrázek 36. *Průměrné hodnoty součinitelů tepelné vodivosti*

9 Závěr

První část diplomové práce je literární rešerší, ve které jsou nejprve popsány materiály užívané při vytváření dřevokompozitu s alkalicky aktivovanou popílkovou matricí. Konkrétně se jedná o dřevo respektive dřevní štěpku, křemičitan sodný, hydroxid sodný a v neposlední řadě popílky respektive AAP. Dále literární rešerše zevrubněji popisuje problematiku dřevokompozitů s anorganickou matricí. Tyto kompozity jsou rozděleny na osm základních druhů dle materiálu matrice a dle rozměrů dřevní výplně. Každý druh kompozitu je popsán z hlediska své materiálové podstaty, způsobu výroby, dosahovaných vlastností a možností aplikace. Na základě této rešerše jsem zjistil, že problematika dřevokompozitů s anorganickou matricí je velice rozsáhlá a jsou produkovány celosvětově ve velkém měřítku. Důvody jejich velké produkce a spotřeby, jsou příznivé vlastnosti, ale především nízké pořizovací náklady, které souvisí s nízkými náklady na základní obnovitelnou surovinu – dřevo. Jejich spotřeba i oblíbenost budou i nadále jistě narůstat, a když si uvědomíme, že dřevokompozity se sádrovou matricí jsou prakticky celé vytvářeny z druhotných surovin, mohl by mít tento nárůst pozitivní vliv na životní prostředí.

V experimentální části diplomové práce byla nejprve vybírána vhodná alkalicky aktivovaná popílková matrice. Tato matrice byla vybírána z 30 různých popílkových past, u nichž se měnily 3 parametry, a to druh popílku, dávka alkalického aktivátoru a silikátový modul alkalického aktivátoru. Na základě dosažených mechanických a fyzikálních vlastností popílkových past, a po uvážení dalších aspektů byla vybrána nejvhodnější alkalicky aktivovaná popílková matrice pro vytvoření dřevokompozitu.

Po nalezení vhodné matrice byly vytvářeny dřevokompozity s alkalicky aktivovanou popílkovou matricí. Vytvořené dřevokompozity se lišily především dávkou dřevní štěpky, kterou obsahovaly v množství 5, 10, 15 a 20 % z hmotnosti popílku. Pro porovnání dosažených výsledků mechanických a fyzikálních vlastností byly vytvořeny referenční vzorky, které štěpku neobsahovaly. Na vytvořených vzorcích byla stanovována objemová hmotnost, tepelná vodivost, pevnost v tlaku a pomocí rastrovací elektronové mikroskopie bylo zkoumáno rozhraní mezi štěpkou a popílkovou matricí.

Na základě výsledků mé diplomové práce lze vyvodit několik závěrů.

- V první řadě je nutné zmínit, že spojením dvou druhotných surovin vznikl materiál, při jehož produkci je životní prostředí jen minimálně zatěžováno.
- Vytvořený materiál se bohužel v některých vlastnostech nevyrovná

štěpkocementu, k němuž byl zamýšlen jako možná alternativa. Konkrétně dosáhl mnohem vyšší objemové hmotnosti s čímž souvisí také mnohem vyšší součinitel tepelné vodivosti. Naopak dřevokompozit s alkalicky aktivovanou popílkovou matricí vykazoval vyšší pevnosti v tlaku v porovnání se štěpkocementem. Výrazná rozdílnost mezi dosahovanými vlastnostmi štěpkocementu a dřevokompozitu s popílkovou matricí je především způsobena odlišným obsahem dřevní štěrky. Ve štěpkocementu se obsah štěrky pohybuje nad 80 %, kdežto v dřevokompozitu s alkalicky aktivovanou popílkovou matricí bylo dosaženo maximální hodnoty 35,41 %. Této hodnoty bylo dosaženo při dávce štěrky 15 % z hmotnosti popílku. Při vyšší dávce štěrky již materiál ztrácel soudržnost, což bylo hlavně způsobeno nasákavostí štěrky, která odebrala značné množství vodního skla a díky tomu nemohla velká část popílku zreagovat. Tento problém by mohl být řešen dvěma způsoby. Jednak je možné navýšit dávku vodního skla, ale mnohem efektivnější by bylo, kdyby tento materiál byl vytvářen stejným způsobem jako klasický štěpkocement, tedy vibrolisován za velkých tlaků. Při vytváření dřevokompozit s alkalicky aktivovanou matricí byl simulován proces vibrolisování, avšak dosažený přítlak 0,0145 kN je ve srovnání s minimálním přítlakem vyvozeným razníkem vibrolisu nepatrný.

- Pokud by byla výrobní směs vytvářena v klasickém vibrolisu, snížil by se celkový obsah matrice. Tím by mohly být odstraněny špatné reologické vlastnosti tohoto materiálu. V čerstvém stavu je směs dřevní štěrky a AAP spíše tekuté konzistence, ale zároveň velmi snadno ulpívá na površích, což velmi znesnadňuje vytváření produktu.
- Vytváření pomocí klasického vibrolisu, by mohlo částečně odstranit nedostatek, který skýtají nízké počáteční pevnosti tohoto materiálu. Aby bylo docíleno dostatečných počátečních pevností dřevokompozitu s alkalicky aktivovanou popílkovou matricí, je nutné do výrobní směsi přidat látku urychlující tuhnutí a tvrdnutí směsi. Pro tento účel je velice vhodná Denka SC-1.
- Ve prospěch dřevokompozitu s alkalicky aktivovanou popílkovou matricí hovoří skutečnost, že se skládá z dostupných surovin
- Mezi přednosti tohoto materiálu bude jistě patřit trvanlivost a požární odolnost. Tyto dvě vlastnosti jsou již potvrzeny u klasického štěpkocementu a náhrada cementu AAP tyto vlastnosti může jedinečně posílit.

Závěrem lze říci, že spojením alkalicky aktivovaného popílku a dřevní štěpky vznikl velice zajímavý materiál, který by si zasloužil rozsáhlejší výzkum, jelikož splňuje několik hlavních požadavků kladených na stavební materiály dnešní doby. Jedná se o materiál, který minimálně zatěžuje životní prostředí. K jeho výrobě se užívají druhotné suroviny, které jsou dostupné, a z finančního hlediska se jedná o velice zajímavý materiál. Dle mého názoru dřevokompozit s alkalicky aktivovanou popílkovou matricí vykazuje také příznivé estetické vlastnosti. Byl bych velice potěšen, kdyby v budoucnu byla tomuto materiálu věnována alespoň malá pozornost a případně byl jeho vývoj posunut směrem ke komerčnímu využití.

10 Použitá literatura

- 1 ŠKVÁRA, F., JÍLEK, T., KOPECKÝ, L. Geopolymer materials based on fly ash. *Ceramics-Silikáty* 2005, **49**, 195–204.
- 2 ŠKVÁRA, F., KOPECKÝ, L., ŠMILAUER, V.; BITTNAR, Z. Material and structural characterization of alkali activated low-calcium brown coal fly ash, *Journal of Hazardous Materials* 2009, **168**, 711–720.
- 3 HARDJITO, H., RANGAN, R.V. Development and properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete. *Research report GC1*. Perth, Australia: Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, 2005.
- 4 PERELYGIN, L.M. *Nauka o dreve*. Bratislava: SVTL, 1965.
- 5 NIKITIN, N.I. *Chemie dřeva*. Praha: SNTL, 1956.
- 6 ROUSEKOVÁ, I., et al. *Stavebné materiály*. Bratislava: Jaga group, 2000.
- 7 MCPHERSON, E.G., SIMPSON, J.R., PEPER, P.J., AGUARON, E. Urban Forestry and Climate Change. *Forest Service, Pacific Southwest Research Station*. Albany, CA: USDA 2008.
- 8 STUPAVSKÝ, V., HOLÝ, T. Dřevní štěrka - zelená, hnědá, bílá. *Biom.cz* [online]. 2010-01-01 [cit. 2011-09-14]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/drevni-stepka-zelena-hneda-bila>>.
- 9 SHI, C., KRIVENKO, P. ROY, D. *Alkaline-Activated Cements and Concretes*, London: Taylor & Francis, 2006.
- 10 GLUKHOVSKY, V.D. Soil Silicates (Gruntosilikaty). Budivelnik Publisher 1959
- 11 DAVIDOVITS, J. Syntetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process. *US Patent* 1981, **4**.
- 12 KRIVENKO, P.V. Influence of physico-chemical aspects of early history of a slag alkaline cement stone on stability of its properties. In *1 st International Conference on Reinforced Concrete Materials in Hot Climates*, Dubai: United Arab Emirates University, Dubai, 1994.
- 13 GLUKHOVSKY, V.D., ROSTOVSKAYA, G.S., RUMYNA, G.V. High strength slag-alkali cement. In *7th International Congress on the Chemistry of Cements*, Paris, 1980.
- 14 ŠULC, R.; SVOBODA, P. Vliv alkalických aktivátorů na geopolymerní malty. In *JUNIORSTAV 2008* [CD-ROM, Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, Brno, 2008,
- 15 MCCARTHY, G.J., SWANSON, K.D, STEINWAND, S.J. X-ray diffraction analysis of fly ash. *Advances in X-ray Analysis* 1988, **31**, 331–332.

- 16 HEMMING, R.T., BERRY, E.E. On the glass in coal fly ashes: Recent advances. *Proceedings of Materials Research Society* 1988, **113**, 3–38.
- 17 AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science* 2010, **36**, 327–363.
- 18 DIAMOND, S. On the glass present in low-calcium and high-calcium fly ashes, *Cement and Concrete Research* 1983, **13**, 459–463,
- 19 MINNICK, L.J., WEBSTER, W.C., PURDY, E.J. Predictions of the effect of fly ash in Portland cement mortar and concrete. *Journal of Materials* 1971, **6**, 163–187.
- 20 GHOSH, A., PRATT, P.L. Studies of the hydration reaction and microstructure of cement-fly ash paste. *MRS Symposium* 1981
- 21 MCDOWELL, J.F. Hydrogarnet-gehlenite hydrate cements from $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass. In 8th International Congress on the Chemistry of Cements, Rio de Janeiro, 1986.
- 22 DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymer cements. In 1 st International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, 1994.
- 23 VAN JAARSVELD, J.G.S, VAN DEVENTER, J.S.J, LUKEY, G.C. The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers. *Materials Letters* 2003, **57**, 1272–1280.
- 24 SHI, C., DAY, R.L. Pozzolanic reactions in presence in chemical activators : Part II: Reactions mechanisms. *Cement and Concrete Research* 2000, **30**, 607–613.
- 25 PALOMO, A., GRUTZECK, M.W., BLANCO, M.T. Alkali-activated fly ashes A cement for the future. *Cement and Concrete Research* 1999, **29**, 1323–1329
- 26 PALOMO, A., et al. Alkali activated of fly ashes. A NMR study of reaction products. *Journal of American Ceramic Society* 2004, **87**, 1141–1145.
- 27 FERNANDÉZ-JIMENÉZ, A., PALOMO, A. Activation of fly ashes: A General View. In *8th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans*, Michigan. American Concrete Institute, Los Angeles, 2004
- 28 WINNEFELD, F , et al. Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials . *Construction and Building Materials* 2010, **24**, 1086-1093
- 29 GRUTZECK, M., KWAN, S., DICOLA, M. Zeolite formation in alkali-activated cementitious systems. *Cement and Concrete Research* 2004, **34**, 949-955
- 30 FERNANDÉZ-JIMENÉZ, A., PALOMO, A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel* 2003, **82**, 2259–2265.
- 31 PUERTAS, A., FERNANDÉZ-JIMENÉZ, A. Mineralogical and microstructural

- characterisation of alkali-activated fly ash/slag pastes. *Cement and Concrete Composites* 2003, **25**, 287–292.
- 32** TEMUJIN, J., WILLIAMS, R.P., VAN RIESEN, A. Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature. *Journal of Materials Processing Technology* 2009, **209**, 5276-5280.
- 33** KATZ, A. Microscopic study of alkali-activated fly ash. *Cement and Concrete Research* 1998, **28**, 197-208
- 34** VAN JAARSVELD, J.G.S, VAN DEVENTER, J.S.J. Effect of the Alkali Metal Activator on the Properties of Fly Ash-Based Geopolymers. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 1999, **38**, 3932-3941
- 35** GUO, X , SHI, H , DICK, W.A. . Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer . *Cement and Concrete Composites* 2010, **32**, 142-147.
- 36** XIE, Z., XI, Y. Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash. *Cement and Concrete Research* 2001, **31**, 1245–1249.
- 37** SWANEPOEL, J.C., STRYDOM, C.A. Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Applied Geochemistry* 2002, **17**, 1143-1148.
- 38** SOMARATNA, J., RAVIKUMAR, D., NEITHALATH, N. Response of alkali activated fly ash mortars to microwave curing . *Cement and Concrete Research* 2010, **40**, 1688-1696 .
- 39** LEE, W.K.W., VAN DEVENTER, J.S.J. The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers. *Colloids and Surfaces* 2002, **211**, 115-126.
- 40** ROVNANÍK, P. Influence of C₁₂A₇ mineral accelerator on the mechanical properties of fly ash based geopolymer. In *12th International Scientific Conference*, Brno. 2009
- 41** CRIADO, M., PALOMO, A., FERNANDÉZ-JIMENÉZ, A. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. *Fuel* 2005, **84**, 2048–2054
- 42** ASHORI A., TABARSA T, K AZIZI., MIRZABEYGI R., Wood–wool cement board using mixture of eucalypt and poplar. *Industrial Crops and Products* 2011, **34**, 1146–1149.
- 43** OKINO E.Y.A., et al. Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. *Cement and Concrete Composites* 2004, **26**, 729–734
- 44** VAN ELTEN, G.J. Production of wood wool cement board and wood strand cement board (ELTOBOARD) on one plant and applications of the products: In *10th*

- International Inorganic Bonded Fiber Composite Conference*. Sao Paolo , 2006.
- 45 DRAHORÁDOVÁ, K. *Stavebnictví3000* [online]. 3.11.2004 [cit. 2011-11-24]. Cetris: nejrozšířenější cementotřískové desky v Evropě. Dostupné z WWW: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/cetris-cementotriskove-desky/>.
- 46 Durisolbuild [online]. 2011 [cit. 2011-11-24]. Material. Dostupné z WWW: <http://durisolbuild.com/material-shtml/>.
- 47 MOSLEMI, A.A. Emerging Technologies in Mineral-Bonded Wood and Fiber Composites. *Advanced Performance Materials* 1999, **6**, 161–179.
- 48 HACHMI M.H., MOSLEMI M.A, Correlation between wood –cement compatibility and wood extractives, *Forest Products Journal* 1989, **6**, , 55–58
- 49 Eltomation [online]. 2011 [cit. 2011-12-09]. .. Dostupné z WWW: <http://www.eltomation.com/Eng/index.html>.
- 50 PEHANICH, J.L, BLANKENHORN, P.R, SILSBEE, M.R. Wood fiber surface treatment level effects on selected mechanical properties of wood fiber–cement composites. *Cement and Concrete Research*. 2004, **34**, 59–65.
- 51 FICHER V.F, WIENHAUS O, RYSEL M, OLDBRECHT J. The water-soluble carbohydrates of wood and their influence on the production of lightweight wood–wools boards. *Holztechnologie* 1974, **15**, 12–9.
- 52 ZHANG, Y Influence of wood extractive on hardening and properties of gypsum plaster and gypsum-bonded particleboard (in Chinese). *Wood Industry*. 1990, **4**, 8–18
- 53 ZHANG, Y . Compatibility of some wood species to the manufacture of gypsum-bonded particleboard (in Chinese). *Wood Industry*, 1990, **4**, s.3–9.
- 54 WEATHERWAX R.C., TARKOV H., Effect of wood on setting of portland cement, *Forest Products Journal* 1964, **12**, 567–570
- 55 PAPADOPOULOS A.N., An investigation of the suitability of some Greek wood species in wood–cement composites manufacture. *European Journal of Wood and Wood Products* 2007, **65**, 245–246.
- 56 JORGE F.C, PEREIRA C., FERREIRA J.M.F., Wood–cement composites: a review. *Holz als Roh-und Werkstoff* 2004, **62**, 370–377.
- 57 ASHORI, A., HAMZEH, Y., AMANI, F, Lemon balm (*Melissa officinalis*): chemical composition and fiber morphology. *Journal of Polymers and Enviroment* 2011, **19**, 297–300.
- 58 HACHMI M.H., CAMPBELL, A.G., Wood–cement chemical relationships, Fiber and Particleboards Bonded with Inorganic Binders, *Forest Products Research Society* 1989,

43–47

- 59 THOMAS N.L., BIRCHALLI J.D., The retarding action of sugars on cement hydration, *Cement Concrete Research* 1983, **13**, 830–842.
- 60 WALTER A., *Part II Thesis*, Department of Metallurgy, Oxford University , 1982.
- 61 OLORUNNISOLA A.O, Dimensional stability of cement-bonded composite boards produced from rattan cane particles. *Journal of Bamboo and Rattan* 2005, **4**, 173–182.
- 62 ASHORI, A; TABARSA, T; SEPAHVAND, S. Cement-bonded composite boards made from poplar strands. *Construction and Building Materials* 2011, **26**, 131/134.
- 63 OLORUNNISOLA, O., ADEFISAN, O.O. Trial production and testing of cement-bonded particleboard from rattan furniture waste. *Wood Fiber Science* 2002, **34**, 116–124.
- 64 ZHENGtian L, MOSLEMI AA. Influence of chemical additives on the hydration characteristics of western larch wood-cement-water mixtures. *Forest Products Journal* 1985, **35**, 37-43.
- 65 Velox [online]. 2011 [cit. 2011-11-30]. Ztracené bednění. Dostupné z WWW: <<http://www.velox.cz/cs/ztracene-bedneni/>>.
- 66 BLANKENHORN, P.L, et al. Effects of fiber surface treatments on mechanical properties of wood fiber–cement composites. *Construction and Building Materials* 2001, **31**, 1049-1055.
- 67 TONOLI, G.H.D, et al. Cellulose modified fibres in cement based composites. *Composites*. 2009, **40**, 2046-2053.
- 68 VAN ELTEN, G.J. Innovation in the Production of Cement-Bonded Particleboard and Wood-Wool Cement Board : In *5th International Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference*. Washington , 1999.
- 69 ARO, M. Wood strand cement board : In *11th International Inorganic Bonded Fiber Composite Conference*. Madrid, 2008.
- 70 DIN 4102. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. *Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin* ,1998.
- 71 Traullit [online]. 2011 [cit. 2011-12-09]. Produkter. Dostupné z WWW: <<http://www.traullit.se/produkter/>>.
- 72 Heraklith [online]. 2011 [cit. 2011-12-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.heraklith.co.uk/>>.
- 73 Anutone [online]. 2011 [cit. 2011-12-13]. Products. Dostupné z WWW: <http://www.anutone.com/products/10_Naturals/Strand%20TDS.pdf>.

- 74 ČSN EN 13501-1 +A1. *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb* :
Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň. Praha : Český normalizační institut, 2010.
- 75 Deng, D. The mechanism for soluble phosphates two Improve the water resistance of magnesium oxychloride cement, *Cement and Concrete Research*, 2003, **33**, 1311-1317.
- 76 HELA, R., FIALA, O., ZACH, J. Protihluková stěna z dřevocementových absorpčních desek. In *Sborník příspěvků - 4. Konference prefabrikace a betonové dílce*. : Česká betonářská společnost, Pardubice, 2007.
- 77 Natur-block [online]. 2011 [cit. 2011-12-01]. Ke stažení. Dostupné z WWW:
<http://www.natur-block.com/admin/data/2011/03/files/file_40bd001563085fc35165329ea1ff5c5ecbdbbee f.pdf>.
- 78 Morfico. [online]. 2006 [cit. 2011-11-30]. Stavební stěnové díly. Dostupné z WWW:
<<http://www.morfico.cz/cs/c/stavebni-stenove-dily/stavebni-stenove-dily.htm>>
- 79 Heluz [online]. 2010 [cit. 2011-12-01]. Pro obvodové a vnitřní zdivo. Dostupné z WWW: <<http://www.heluz.cz/katalog/pro-obvodove-a-vnitri-zdivo/heluz-family/heluz-family-50-brouseno-50-8107.xhtml>>.
- 80 Ytong [online]. 2011 [cit. 2011-12-01]. Obvodové stěny. Dostupné z WWW:
<<http://www.ytong.cz/cs/content/obvodove-steny.php>>.
- 81 ČSN EN 1793-2. *Zařízení pro snížení hluku silničního provozu – Zkušební metody stanovení akustických vlastností : Část 2: Určení vzduchové neprůzvučnosti laboratorní metodou*. Praha : Český normalizační institut, 1998.
- 82 ČSN EN 1793-1. *Zařízení pro snížení hluku silničního provozu – Zkušební metody stanovení akustických vlastností : Část 1: Určení zvukové pohltivosti laboratorní metodou*. Praha : Český normalizační institut, 1998.
- 83 ASHORI, A., TABARSA, T., AMOSI, F. Evaluation of using waste timber railway sleepers in wood–cement composite materials. *Construction and Building Materials* 2011, **27**, 126-129.
- 84 VAN ELTEN, E.J. Cement bonded particle board (CBPB) and wood strand cement board (ELTOBOARD): production, properties and applications. In *10 Int. Inorganic-bonded fiber composites conference* ,Sao Paolo, 2006
- 85 VAN ELTEN, B. New developed Eltomation plant capable to produce all types of: - wood wool cement board (WWCB); - wood strand cement board (WSCB - ELTOBOARD); and – large WWCB wall elements. In *11th International Inorganic*

- Bonded Fiber Composite Conference*. Madrid. 2008.
- 86 Cetris [online]. 2011 [cit. 2011-11-24]. Rady a informace. Dostupné z WWW: <http://www.cetris.cz/rady-a-informace/vlastnosti-desek-cetris/>.
- 87 SOROUSIAN, P., et al. Development of accelerated processing techniques for cement-bonded wood particleboard. *Cement and Concrete Composites*. 2003, **25**, 721-727.
- 88 SIMATUPANG, M.H., et al. Investigations on the Influence of the Addition of Carbon Dioxide on the Production and Properties of Rapidly Set Wood-Cement Composites. *Cement and Concrete Composites*. 1995, **17**, 187-197.
- 89 Architecturalproducts [online]. 2011 [cit. 2011-12-14]. Downloads. Dostupné z WWW: <http://architecturalproducts.com/downloads/Versaroc%20Catalog.pdf>.
- 90 DENG, Y.H., FURUNO, T. Properties of gypsum particleboard reinforced with polypropylene fibers. *Journal of Wood Science*. 2000, **47**, 445-450.
- 91 DENG, Y.H., FURUNO, T., WU, Y.F. Effect of buffers on gypsum particleboard properties. *Journal of Wood Science*. 2000, **47**, 356-361.
- 92 Ecologicalbuildingsystems [online]. 2003 [cit. 2011-12-14]. Workspace. Dostupné z WWW: <http://www.ecologicalbuildingsystems.com/workspace/downloads/Sasmox-Blue-Brochure.pdf>.
- 93 SINGH, M., GARG, M. Gypsum-based fibre-reinforced composites: alternative to timber. *Construction and Building Materials*. 1994, **3**, 155-160.
- 94 DENG Y., FURUNO T. Study on gypsum-bonded particleboard reinforced with jute fibers. *Holzforschung* 2002, **56**, 440–445
- 95 DENG, Y., XUAN, L., FENG, Q. Effect of waterproof agent on gypsum particleboard properties. *Holzforschung*, 2006, **60**, 318–321.
- 96 ESPINOZA-HERRERA, R., CLOUTIER, A. Physical and mechanical properties of gypsum particleboard reinforced with Portland cement. *European Journal of Wood and Wood Products* 2011, **69**, 247–254.
- 97 ESPINOZA-HERRERA, R., CLOUTIER, A. Compatibility of four eastern Canadian woods with gypsum and gypsum-cement binders by isothermal calorimetry. *Maderas, Cienc Tecnol* 2008, **10**, 275–288.
- 98 OKINO E.Y.A, et.al. Physico-mechanical properties and decay resistance of Cupressus spp. cement-bonded particleboards. *Cement and Concrete Composites* 2005, **27**, 333–338.
- 99 Fermacell [online]. 2011 [cit. 2011-11-24]. O materiálu fermacell. Dostupné z WWW:

- <http://www.fermacell.cz/cz/content/fermacell_sadrovlaknite_desky_vyroba.php>.
- 100** Ebmco [online]. 2011 [cit. 2011-11-24]. Produkty. Dostupné z WWW:
<http://www.ebmco.sk/cz/czech/produkty/product-detail_cz/pr/roofing-slates/roofing-slate-smooth.html>.
- 101** Cembrit [online]. 2011 [cit. 2011-11-28]. Produkty. Dostupné z WWW:
<<http://cembrit.cz/strechy/>>.
- 102** PYTLÍK, P. *Vlastnosti a užití stavebních výrobků*. Brno : Vutium, 1998.
- 103** ČSN EN 196 - 1. Metody zkoušení cementu : Část 1 : Stanovení pevnosti. Praha : Český normalizační institut, 2005.
- 104** KATZ, A. Microscopic study of alkali-activated fly ash. *Cement and Concrete Research* 1998, **28**, 197-208.
- 105** ČSN EN 196 - 3+A1. Metody zkoušení cementu : Část 3 : Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti. Praha : Český normalizační institut, 2009.
- 106** PRESSAL [online]. 2007 [cit. 2011-12-04]. Mobilní vibrolis. Dostupné z WWW:
<<http://www.pressal.cz/?sec=Mobilni-vibrolis&lang=cz>>.
- 107** ČSN EN 12390-7. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu, Praha : Český normalizační institut, 2009.
- 108** ČSN EN 12390-3. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles, Praha : Český normalizační institut, 2009.
- 109** ČSN EN 993-14. Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky tvarové hutné - Část 14: Stanovení tepelné vodivosti metodou topného drátu (křížové uspořádání), Praha : Český normalizační institut, 1999.

11 Seznam zkratk

AAP – alkalicky aktivovaný popílek

PP – polypropylen

PAN – polyakrylonitril

M_s – silikátový modul

12 Seznam příloh

1 Kumulativní objem pórů ztvrdlých popílkových past z popílku Dětmarovice

2 Kumulativní objem pórů ztvrdlých popílkových past z popílku Chvaletice

Příloha číslo 1. Kumulativní objem pórů ztvrdlých popílkových past z popílku Dětmarovice

Ms 1,0			Ms 1,5			Ms 2,0			Ms 2,5			Ms 3,23		
Průměr pórů [μm]	Kumulativní objem pórů [cm ³ /g]	Průměr pórů [μm]	Kumulativní objem pórů [cm ³ /g]	Průměr pórů [μm]	Kumulativní objem pórů [cm ³ /g]	Průměr pórů [μm]	Kumulativní objem pórů [cm ³ /g]	Průměr pórů [μm]	Kumulativní objem pórů [cm ³ /g]	Průměr pórů [μm]	Kumulativní objem pórů [cm ³ /g]	Průměr pórů [μm]	Kumulativní objem pórů [cm ³ /g]	Průměr pórů [μm]
55,1409	0,0024	60,0871	0,0019	60,0871	0,0017	64,5937	0,0036	60,8964	0,0037	60,8964	0,0037	60,8964	0,0037	60,8964
26,0234	0,0035	25,3309	0,0028	25,6907	0,0035	26,5194	0,0036	23,9236	0,0037	23,9236	0,0037	23,9236	0,0037	23,9236
17,6796	0,0035	18,1954	0,0056	17,9962	0,0035	18,3990	0,0036	17,3739	0,0050	17,3739	0,0050	17,3739	0,0050	17,3739
12,2452	0,0059	12,0495	0,0056	12,1384	0,0035	11,3821	0,0036	11,4760	0,0062	11,4760	0,0062	11,4760	0,0062	11,4760
7,0156	0,0071	7,1742	0,0066	7,0457	0,0069	7,0156	0,0048	6,9696	0,0099	6,9696	0,0099	6,9696	0,0099	6,9696
2,8397	0,0130	2,8555	0,0132	2,7886	0,0553	2,8656	0,0490	2,8791	0,1489	2,8791	0,1489	2,8791	0,1489	2,8791
2,1383	0,0283	2,1763	0,0404	2,1614	0,0933	2,1565	0,0849	2,1876	0,1712	2,1876	0,1712	2,1876	0,1712	2,1876
1,4650	0,0472	1,4742	0,0902	1,4639	0,1209	1,4741	0,1112	1,4763	0,1960	1,4763	0,1960	1,4763	0,1960	1,4763
1,1076	0,0709	1,1059	0,1071	1,0996	0,1365	1,1054	0,1220	1,1134	0,2084	1,1134	0,2084	1,1134	0,2084	1,1134
0,8069	0,0933	0,8095	0,1203	0,8059	0,1468	0,8128	0,1351	0,8060	0,2159	0,8060	0,2159	0,8060	0,2159	0,8060
0,5431	0,1087	0,5442	0,1325	0,5425	0,1572	0,5424	0,1423	0,5362	0,2245	0,5362	0,2245	0,5362	0,2245	0,5362
0,3984	0,1216	0,3991	0,1438	0,3981	0,1641	0,3980	0,1471	0,3904	0,2307	0,3904	0,2307	0,3904	0,2307	0,3904
0,2566	0,1370	0,2565	0,1579	0,2575	0,1745	0,2571	0,1554	0,2546	0,2357	0,2546	0,2357	0,2546	0,2357	0,2546
0,2015	0,1441	0,2025	0,1644	0,2016	0,1762	0,2015	0,1590	0,2005	0,2407	0,2005	0,2407	0,2005	0,2407	0,2005
0,1385	0,1594	0,1388	0,1804	0,1387	0,1848	0,1390	0,1662	0,1381	0,2456	0,1381	0,2456	0,1381	0,2456	0,1381
0,0999	0,1701	0,1005	0,1908	0,1005	0,1935	0,0997	0,1710	0,1002	0,2481	0,1002	0,2481	0,1002	0,2481	0,1002
0,0817	0,1760	0,0817	0,1973	0,0821	0,2021	0,0817	0,1746	0,0822	0,2531	0,0822	0,2531	0,0822	0,2531	0,0822
0,0503	0,1949	0,0502	0,2133	0,0502	0,2315	0,0500	0,1829	0,0502	0,2630	0,0502	0,2630	0,0502	0,2630	0,0502
0,0361	0,1984	0,0362	0,2199	0,0361	0,2591	0,0361	0,1937	0,0361	0,2680	0,0361	0,2680	0,0361	0,2680	0,0361
0,0259	0,2055	0,0258	0,2236	0,0258	0,2850	0,0258	0,2021	0,0258	0,2717	0,0258	0,2717	0,0258	0,2717	0,0258
0,0181	0,2114	0,0181	0,2302	0,0181	0,2988	0,0181	0,2080	0,0181	0,2742	0,0181	0,2742	0,0181	0,2742	0,0181
0,0121	0,2185	0,0121	0,2406	0,0121	0,3092	0,0121	0,2140	0,0121	0,2816	0,0121	0,2816	0,0121	0,2816	0,0121
0,0091	0,2338	0,0091	0,2500	0,0091	0,3144	0,0091	0,2224	0,0091	0,2890	0,0091	0,2890	0,0091	0,2890	0,0091
0,0072	0,2504	0,0072	0,2575	0,0072	0,3213	0,0072	0,2248	0,0072	0,2965	0,0072	0,2965	0,0072	0,2965	0,0072
0,0060	0,2669	0,0060	0,2650	0,0060	0,3265	0,0060	0,2296	0,0060	0,3027	0,0060	0,3027	0,0060	0,3027	0,0060

Příloha číslo 2. Kumulativní objem pórů ztvrdlých popílkových past z popílku Chvaletice

Ms 1,0			Ms 1,5			Ms 2,0			Ms 2,5			Ms 3,2,3		
Průměr pórů [μm]	Kumulativní objem pórů [cm ³ /g]	Průměr pórů [μm]	Kumulativní objem pórů [cm ³ /g]	Průměr pórů [μm]	Kumulativní objem pórů [cm ³ /g]	Průměr pórů [μm]	Kumulativní objem pórů [cm ³ /g]	Průměr pórů [μm]	Kumulativní objem pórů [cm ³ /g]	Průměr pórů [μm]	Kumulativní objem pórů [cm ³ /g]	Průměr pórů [μm]	Kumulativní objem pórů [cm ³ /g]	Průměr pórů [μm]
59,1053	0,0012	62,5821	0,0032	61,1021	0,0039	65,2933	0,0012	60,0871	0,0022	60,0871	0,0022	60,0871	0,0022	60,0871
25,5095	0,0036	26,6366	0,0053	26,0234	0,0051	25,8006	0,0012	26,1740	0,0022	26,1740	0,0022	26,1740	0,0022	26,1740
17,8541	0,0036	18,0862	0,0053	17,9784	0,0064	18,5120	0,0012	18,4177	0,0044	18,4177	0,0044	18,4177	0,0044	18,4177
11,0148	0,0036	11,4760	0,0053	12,0254	0,0064	12,0495	0,0037	12,2619	0,0044	12,2619	0,0044	12,2619	0,0044	12,2619
6,9163	0,0036	7,0622	0,0053	6,9163	0,0077	6,9589	0,0037	7,0320	0,0066	7,0320	0,0066	7,0320	0,0066	7,0320
2,8073	0,0036	2,8534	0,0085	2,8390	0,0116	2,8375	0,0061	2,8189	0,0399	2,8189	0,0399	2,8189	0,0399	2,8189
2,1679	0,0036	2,1186	0,0106	2,1638	0,0308	2,1438	0,0635	2,1684	0,1439	2,1684	0,1439	2,1684	0,1439	2,1684
1,4536	0,0036	1,4542	0,0106	1,4581	0,1169	1,4601	0,1393	1,4799	0,1716	1,4799	0,1716	1,4799	0,1716	1,4799
1,0613	0,0059	1,1012	0,0286	1,1032	0,1323	1,0979	0,1589	1,1158	0,1871	1,1158	0,1871	1,1158	0,1871	1,1158
0,7957	0,0202	0,8115	0,0753	0,7834	0,1426	0,7910	0,1723	0,8005	0,2092	0,8005	0,2092	0,8005	0,2092	0,8005
0,5398	0,0534	0,5324	0,0986	0,5200	0,1490	0,5279	0,1809	0,5339	0,2303	0,5339	0,2303	0,5339	0,2303	0,5339
0,3890	0,0712	0,3859	0,1071	0,3959	0,1490	0,3927	0,1870	0,3943	0,2458	0,3943	0,2458	0,3943	0,2458	0,3943
0,2555	0,0795	0,2556	0,1124	0,2523	0,1555	0,2535	0,1955	0,2528	0,2613	0,2528	0,2613	0,2528	0,2613	0,2528
0,2008	0,0831	0,2017	0,1167	0,1995	0,1593	0,2013	0,2041	0,1982	0,2668	0,1982	0,2668	0,1982	0,2668	0,1982
0,1365	0,0879	0,1368	0,1220	0,1368	0,1696	0,1379	0,2163	0,1362	0,2768	0,1362	0,2768	0,1362	0,2768	0,1362
0,0997	0,0879	0,0995	0,1294	0,1004	0,1786	0,1000	0,2212	0,0997	0,2823	0,0997	0,2823	0,0997	0,2823	0,0997
0,0821	0,0914	0,0821	0,1379	0,0817	0,1850	0,0818	0,2261	0,0816	0,2856	0,0816	0,2856	0,0816	0,2856	0,0816
0,0500	0,0926	0,0501	0,1591	0,0502	0,2043	0,0502	0,2322	0,0501	0,2945	0,0501	0,2945	0,0501	0,2945	0,0501
0,0361	0,0938	0,0361	0,1803	0,0362	0,2159	0,0361	0,2334	0,0361	0,2967	0,0361	0,2967	0,0361	0,2967	0,0361
0,0258	0,0974	0,0258	0,2005	0,0259	0,2236	0,0258	0,2371	0,0258	0,3011	0,0258	0,3011	0,0258	0,3011	0,0258
0,0181	0,0974	0,0181	0,2164	0,0181	0,2313	0,0181	0,2395	0,0181	0,3045	0,0181	0,3045	0,0181	0,3045	0,0181
0,0121	0,1128	0,0121	0,2281	0,0121	0,2364	0,0121	0,2432	0,0121	0,3100	0,0121	0,3100	0,0121	0,3100	0,0121
0,0091	0,1294	0,0091	0,2334	0,0091	0,2390	0,0091	0,2469	0,0091	0,3133	0,0091	0,3133	0,0091	0,3133	0,0091
0,0072	0,1401	0,0072	0,2365	0,0072	0,2428	0,0072	0,2518	0,0072	0,3177	0,0072	0,3177	0,0072	0,3177	0,0072
0,0060	0,1508	0,0060	0,2419	0,0060	0,2480	0,0060	0,2542	0,0060	0,3222	0,0060	0,3222	0,0060	0,3222	0,0060